



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



JOÃO PAULO GONÇALVES SIMIM

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DOS RECURSOS HIDRICOS PELA PCH FUMAÇA E
PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA A OPERAÇÃO DESSA USINA

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2015

JOÃO PAULO GONÇALVES SIMIM

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DOS RECURSOS HIDRICOS PELA PCH FUMAÇA E
PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA A OPERAÇÃO DESSA USINA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

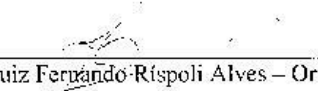
Orientador: Prof. Luiz Fernando Rispoli
Alves

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Julho/2015

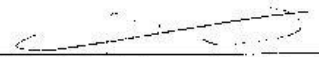
Monografia defendida e aprovada, em 09 de julho de 2015, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves – Orientador



Prof. Dr. Alan Kardek Rego Segundo – Professor Convidado



Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva – Professor Convidado

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família por todo apoio e dedicação. A Fundação Gorceix, por me apoiar e incentivar. A UFOP e Escola de Minas, juntamente com todos os seus professores. Aos meus tutores do curso de Engenharia de Controle e Automação, que sempre me instruíram com dedicação.

Agradeço as Empresas Novelis do Brasil, Mainart Energética e BEI – Brasil Energia Inteligente, que sempre me incentivaram nesta pesquisa e me forneceram todas as informações necessárias para a realização deste trabalho.

Agradeço em especial ao José Alcantara, Joab e Gustavo Souza por me guiar e incentivar nos primeiros passos da minha carreira profissional.

RESUMO

A proposta deste trabalho é o estudo para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos na geração de energia elétrica. Neste trabalho foi estudado a operação de uma Pequena Central Hidrelétrica, a PCH Fumaça localizada no município de Mariana – MG. A partir dos estudos realizados na operação da PCH Fumaça, pode-se fazer uma análise de como é aproveitado os recursos hídricos nessa usina. A partir dos resultados nesse estudo é proposto uma metodologia para otimizar o aproveitamento hídrico desta PCH. Este estudo pode ser aplicado em outras PCHs. Durante a análise dos dados de operação da PCH Fumaça, são discutidos a função de geração hidráulica, conceitos de hidrologia e aproveitamento hídrico.

Palavras-chave: PCH, Pequenas Centrais Hidrelétricas, Hidrologia, Recursos Hídricos, Geração Hidráulica.

ABSTRACT

The purpose of this work is the study for the best use of water resources to generate electricity. In this work the operation of a small hydroelectric plant, the PCH Smoke located in the Municipality of Mariana - MG. From the studies carried out in the operation of the Smoke PCH, you can do an analysis of how it is harnessed water resources in that plant. From the results of this study proposed a methodology to optimize water use this PCH. This study can be applied to other power plants. During the analysis of the operating data of Smoke PCH, it is discussed the function of hydraulic generation, hydrology concepts and water use.

Keywords: PCH Small Hydroelectric Plants, Hydrology, Water Resources, Hydraulic Generation.

LISTA DE ABREVIACES

CLP	Controlador Lógico Programável
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
MME	Ministério de Minas e Energia
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
MAE	Mercado Atacadista de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétrica
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
ANA	Agência Nacional de Aguas

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Ficha Técnica da PCH Fumaça _____	24
Tabela 2- Ocorrências de Chuvas Estação Hidrométrica Funil Jusante _____	33
Tabela 3- Curva Cota X Área X Volume _____	36
Tabela 4 - Resumo vertimento maior perda de agua _____	47
Tabela 5- Analise individuais de situações onde ocorreram vertimento _____	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Estrutura Organizacional do Setor Elétrico Brasileiro	12
Figura 1-2 - Matriz Energética Brasileira.....	15
Figura 1-3 - Emissões de c-co ₂ por fonte.....	16
Figura 2-1 - Processo de conversão de energia hidráulica	20
Figura 2-2 - Processo de conversão de energia	23
Figura 3-1- Disposição PCH Fumaça.....	25
Figura 3-2- Diagrama Sistema Mainart.....	25
Figura 3-3- Trecho do Rio Gualaxo entre as PCH Funil e Fumaça	26
Figura 3-4- Estações Hidrométricas da PCH Fumaça	27
Figura 3-5 - Estação Hidrométrica PCH Funil Jusante	28
Figura 3-6 - Estação hidrométrica Fumaça Montante	29
Figura 3-7 - Estação Hidrométrica Fumaça Jusante	30
Figura 3-8 - Estação Hidrométrica Fumaça Barramento.....	31
Figura 3-9- Área de drenagem PCH Fumaça	32
Figura 3-10- Afluente Rio Gualaxo - Entre Estações Funil Jusante e Fumaça Montante.....	34
Figura 3-11 - Representação da Central Hidrelétrica	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Justificativa e Motivação	14
1.2	Objetivos.....	17
1.3	Metodologia.....	17
2	CONCEITOS PERTINENTES	19
2.1	Pequenas Centrais Hidrelétricas	19
2.1.1	Princípio de Funcionamento.....	19
2.1.2	Elementos que compõe a PCH	20
2.2	Estações Hidrométricas.....	21
2.2.1	Telemetria.....	21
2.3	Princípio de funcionamento da Geração hidráulica de Energia Elétrica	22
2.4	Perdas na Geração.....	23
3	DESENVOLVIMENTO	24
3.1	Introdução	24
3.2	Sistema de Coleta de Dados.....	26
3.2.1	Estação Funil Jusante	28
3.2.2	Estação Fumaça Montante	29
3.2.3	Estação Fumaça Jusante	29
3.2.4	Estação Fumaça Barramento.....	30
3.2.5	Dados de Geração.....	31

3.3	Estudos Hidrológicos	31
3.3.1	Tempo de percurso entre as Estações Funil Jusante e Fumaça Montante	32
3.3.2	Área de drenagem Incremental da PCH Fumaça.....	33
3.3.3	Curva Cota X Área do Lago	35
3.3.4	Modelagem Matemática do Lago de Fumaça.....	36
3.3.5	Conclusão	38
3.4	Modelagem da PCH Fumaça	38
3.4.1	Vazão Turbinada.....	39
3.4.2	Altura da Coluna D'Água.....	39
3.4.3	Função de Geração	40
3.4.4	Índice de eficiência das unidades geradoras.....	40
3.4.5	Potência Efetiva	43
3.5	Análise da Operação Atual da PCH Fumaça	44
3.5.1	Parâmetros de Operação	44
3.5.2	Vertimento	44
3.6	Metodologia Proposta	49
3.6.1	Especificação dos parâmetros operacionais	49
3.6.2	Preparação do lago para recebimento de águas de chuva.....	51
3.7	Conclusão.....	52
REFERÊNCIAS		Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica, desde o seu surgimento, sempre esteve ligada a melhoria na qualidade de vida do ser humano, possibilitando a evolução da saúde, educação e economia. As primeiras centrais de geração de energia elétrica surgiram no final do século XIX, essas centrais de geração eram hidráulicas e se localizavam próximo a municípios devido a dificuldade de transmissão na época. (Flórez, 2014)

As Pequenas Centrais Hidrelétrica iniciaram a sua operação suprimindo demandas para iluminação pública, mas com a crescente evolução da energia elétrica desde a sua criação essas usinas se tornaram a força motriz da indústria e comércio.

Segundo, (Rodrigo Moraes Rosas Ávila; Marcelo Rodrigues Bessa, 2014) e (Guilherme A. R. Maia; Renato C. Zambon; Mario T. L. Barros, 2011) visando a atrair o capital privado para uma maior competitividade e redução nas tarifas energéticas deu início a abertura do mercado de geração com um novo modelo institucional do setor elétrico.

“O atual modelo institucional do setor elétrico brasileiro começou a ser delineado em 1995, mas apenas em 2004 foi definida a nova base legal com uma regulação mais rígida em relação à anterior. ” (Rodrigo Moraes Rosas Ávila; Marcelo Rodrigues Bessa, 2014)

O atual modelo do setor elétrico brasileiro foi criado com o objetivo de assegurar investimentos para a expansão da oferta de energia visto que não havia mais viabilidade do estado suprir toda a nova demanda. Os princípios básicos do atual modelo do setor elétrico segundo (LESCANO, 2004) são:

- Privatização, com o intuito de atrair o capital privado para os investimentos e aumentar o número de Agentes para fomentar a competição;
- Competição na geração e na comercialização, a qual deve ser o grande estímulo para o aumento da eficiência e redução dos preços;
- Livre acesso às redes de transmissão e distribuição, de forma a permitir efetivamente a competição na produção e na comercialização. As atividades de transmissão e distribuição passaram a constituir monopólios regulados;
- Desverticalização, separação entre as atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização, para que todos os Agentes tenham tratamento igualitário ao solicitar acesso aos sistemas de transmissão e distribuição.

Na atual estrutura organizacional do atual modelo do setor elétrico brasileiro, o Conselho Nacional de Política Energética – CNPE, tem a função de assessorar a Presidência da República, formulando políticas e diretrizes de energia ocupando o primeiro nível hierárquico. Em sequência tem-se o Ministério de Minas e Energia – MME, detentor do Poder Concedente, o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), com a função de avaliar a segurança do suprimento de energia elétrica; e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável pelo planejamento a Longo Prazo. Em um terceiro nível encontra-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por regular e fiscalizar o Setor Elétrico Nacional. Vinculados a ANEEL estão, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), criada para dar continuidade às atividades do MAE (Mercado Atacadista de Energia).

Tem-se a representação dessa estrutura na Figura 1-1 - Estrutura Organizacional do Setor Elétrico Brasileiro.

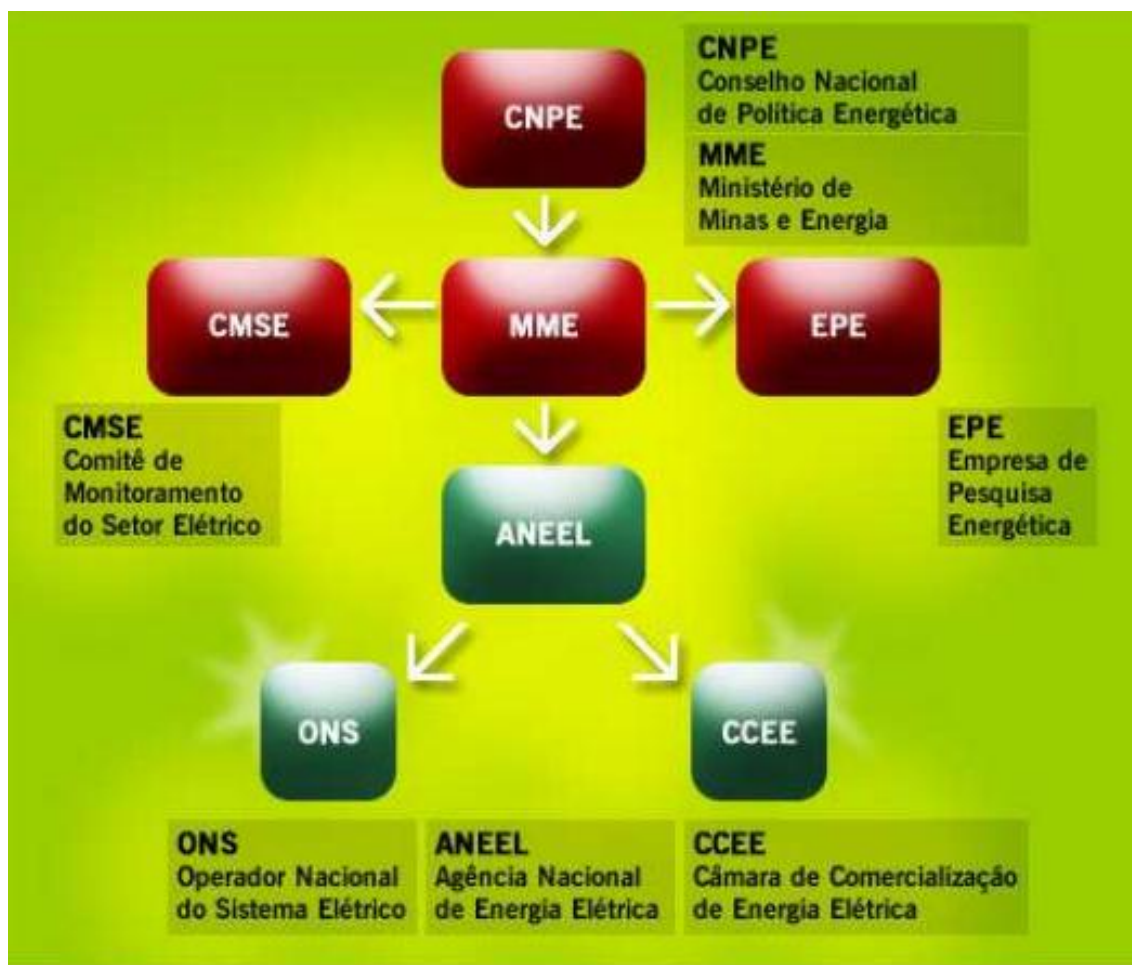


Figura 1-1 - Estrutura Organizacional do Setor Elétrico Brasileiro

“A dependência em recursos hídricos para a geração de energia elétrica, associada ao tamanho em extensão do território brasileiro e a sazonalidade dos períodos de chuva entre as regiões, fez com que o Brasil desenvolvesse um dos maiores sistemas elétricos interligados do mundo. Isto permite que as regiões que atravessassem períodos de estiagem possam ter seu suprimento de energia proveniente de regiões onde há sobra de energia armazenada em reservatórios (Intercâmbio de Energia). ” (VIEIRA, 2007)

“O sistema de produção e transmissão de energia elétrica no Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN), é de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e múltiplos proprietários. Nos últimos 11 anos, em média 91% da geração foi de origem hidrelétrica, o restante complementado pelas usinas térmicas e outras fontes alternativas. Embora representando parcela menor na geração, o sistema inclui centenas de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), com potência instalada entre 1 e 30 MW e reservatórios de até 3 Km². Segundo a ANEEL, as PCHs representam um dos principais focos de prioridade para

o aumento da oferta de energia elétrica no Brasil. ” (Guilherme A. R. Maia; Renato C. Zambon; Mario T. L. Barros, 2011)

O Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, tem como objetivo operar o Sistema Interligado Nacional, além de assegurar a qualidade, continuidade e economicidade da energia elétrica. Com isso o ONS fica responsável pelo planejamento da operação das grandes usinas hidrelétricas bem como das termelétricas, fazendo o que é chamado de despacho dessas usinas para que cumpra com seu objetivo da qualidade e continuidade da energia elétrica.

Segundo (VIEIRA, 2007), devido a limitação de energia armazenada em reservatórios hidrelétricos e a tendência hidrológica é tomada uma decisão operativa, de despachos das termelétricas. Essa decisão é tomada pelo ONS para cada período.

O processo da cadeia de planejamento é todo coordenado pelo ONS, de forma a se ter um órgão independente, e sem fins lucrativos, na responsabilidade de cada etapa do processo, garantindo desta forma que a curva de carga durante a operação em tempo real seja atendida com confiabilidade e que sejam respeitados os interesses de cada Agente Gerador. (VIEIRA, 2007)

Apesar do planejamento ser centralizado pelo ONS, os diversos agentes geradores, o que inclui as PCHs, dentro das regras de comercialização de energia tem a liberdade de aplicar suas estratégias de venda e com isso a responsabilidade do seu próprio planejamento e despacho.

Devido aos últimos fatos relacionados a crise hídrica que atingiu o Sudeste, o uso e a conservação dos recursos hídricos ocuparam um espaço ainda mais relevante no desenvolvimento econômico sustentável. Com isso a responsabilidade do planejamento da operação das Pequenas Centrais Hidrelétricas se torna ainda mais relevante, para que se possa realizar o uso da água para geração de energia causando um menor impacto ambiental e melhor aproveitamento dos recursos hídricos.

1.1 Justificativa e Motivação

No primeiro semestre de 2015 um dos assuntos mais recorrentes na mídia foi a crise hídrica que assolou o Sudeste. Grandes metrópoles como São Paulo e Belo Horizonte chegaram a níveis críticos de seus reservatórios, levando até o racionamento de água para a população.

Além da questão climática, os especialistas apontam outros culpados para o problema da falta de água. Por isso, muita gente tem dito que um dos pontos positivos da seca atual é aprendermos com ela e começarmos a tratar com mais cuidado a água de que dispomos e nossos recursos hídricos.

Com a crescente demanda energética e com a escassez de água, temas como a otimização da geração de energia vem ganhando importância no cenário atual.

“Pensar em formas de otimizar a geração de energia e obter novas fontes renováveis é algo bem interessante no âmbito ambiental, social e econômico”. (Guilherme A. R. Maia; Renato C. Zambon; Mario T. L. Barros, 2011)

A matriz energética brasileira pode contribuir de duas maneiras significativas na manutenção dos recursos hídricos. Contribui indiretamente através da emissão de gases causadores do efeito estufa, como o CO₂ que é emitido na queima de combustíveis fósseis utilizados nas termelétricas, alterando no clima e ciclos de chuva e contribui diretamente no uso propriamente dito dos recursos hídricos.

Como pode ser visto na Figura 1-2 - Matriz Energética Brasileira, a distribuição da atual matriz energética brasileira tem como seus principais contribuintes as fontes de recursos hídricos.

Apesar da grande relevância do termo sustentabilidade, infelizmente nos últimos dez anos, com o gigantesco aumento das usinas termelétricas, o que pode se perceber foi um cenário bem diferente do que estaria dentro de um conceito de sustentabilidade.

“O novo modelo do setor elétrico não maximiza a utilização das diversas fontes para a geração de energia elétrica, desperdiçando a diversidade e a localização dos recursos naturais disponíveis no território nacional. ” (Adriano Pires; Abel Holtz, 2012)

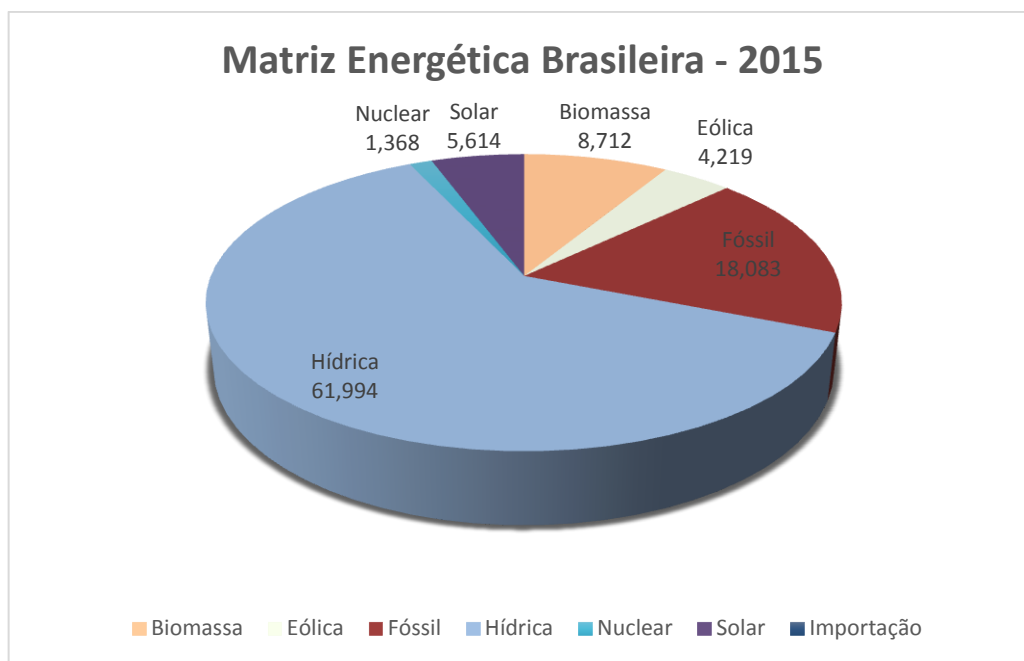


Figura 1-2 - Matriz Energética Brasileira

FONTE: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>

Além de não aproveitar da utilização da diversidade de recursos naturais para a geração de energia a matriz energética brasileira contribui para o aumento da emissão de gases causadores do efeito estufa, como o CO₂. Ou seja, ainda há muito o que ser feito para que o Brasil possa contar com uma matriz energética com níveis de emissão de gases, causadores do efeito estufa, aceitáveis.

Segundo Geraldo Lúcio, secretário executivo do centro nacional de referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH – CERPCH, a geração de energia através das PCHs apresenta uma alternativa com baixas emissões de carbono, podendo até ser utilizada como ferramenta para o alcance de metas de emissão de CO₂ estabelecidas pelo protocolo de Quioto.

Na Figura 1-3 - Emissões de c-co₂ por fonte, tem-se as curvas referentes as emissões de C-CO₂ da termelétrica operando com quatro diferentes tipos de combustíveis e as curvas referentes as emissões da PCH estabelecido para dois cenários, o primeiro cenário para PCHs com 15 MW de potência instalada e reservatório de 3 km² e no segundo cenário para PCHs com 15 MW de potência instalada e reservatório de 13 km². (GERALDO LÚCIO TIAGO FILHO; CAMILA FERNANDES NUNES, 2008)

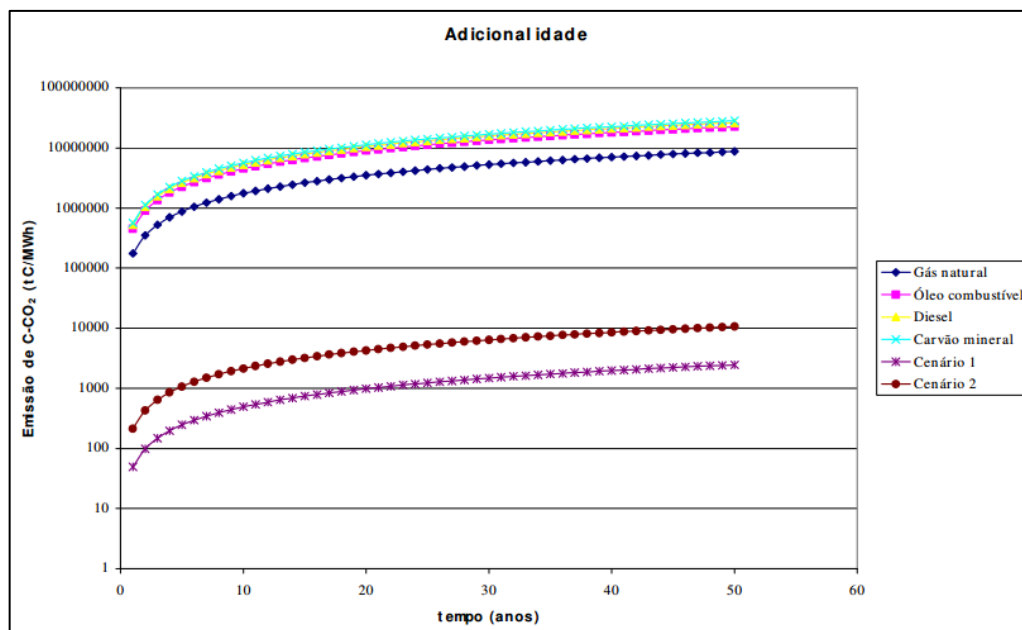


Figura 1-3 - Emissões de c-co2 por fonte

FONTE: (A APLICAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESENVOLVIMENTO LIMPO – MDL EM PROJETOS DE IMPLANTAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – PCHS EM SISTEMAS ISOLADOS NO BRASIL, 2008)

As emissões de gases pelas PCHs são provenientes de seus reservatórios. Esses gases são gerados a partir da decomposição da biomassa original inundada, da biomassa formada pelo processo de fotossíntese nas águas do reservatório e da matéria orgânica proveniente da bacia de drenagem do reservatório. A emissão de gases diminui com o tempo, sendo a maior contribuição nos três primeiros anos depois da inundação. (SBRISIA, 2008)

Com os dados apresentados não há dúvidas da vantagem ambiental na substituição da geração através de geradores a partir de combustíveis fósseis para geração de energia limpa, através de fontes renováveis sobretudo as PCHs.

1.2 Objetivos

A proposta deste trabalho é o estudo para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos na geração de energia elétrica. Neste trabalho foi estudado a operação de uma Pequena Central Hidrelétrica, a PCH Fumaça localizada no município de Mariana – MG. A partir dos estudos realizados na operação da PCH Fumaça, pode-se fazer uma análise de como é aproveitado os

recursos hídricos nessa usina. Ainda dentro da proposta desse trabalho, é previsto a otimização de parâmetros operacionais referente a transformação da energia potencial da água e do aproveitamento de águas, que acabam sendo desperdiçadas quando não há uma previsão e preparação do lago, provenientes de chuvas a montante do reservatório.

1.3 Metodologia

Para se alcançar os objetivos propostos o estudo irá se dividir em dois subgrupos de estudo, denominados, otimização da geração e aproveitamento de águas de chuva. Ambos os grupos serão devidamente explicados em tópicos posteriores.

O desenvolvimento desse trabalho utilizou-se de ferramentas de melhoria contínua, seis sigmas, para o estudo e levantamento de índices e indicadores da eficiência da atual operação e a validação de resultados, comparando o sistema proposto com o atual. A sequência dos estudos adotados foram:

- Levantamento e preparação dos dados:

Nessa etapa foram coletados os dados a partir do banco de dados existente referente a Pequena Central Hidrelétrica de Fumaça, a qual foi realizada os estudos para este trabalho. Após a coleta desses dados, pode se perceber uma série de fatores que atrapalhavam a confiabilidade dos mesmos criando se então a necessidade de um tratamento prévio desses dados.

- Estudo e Análise do atual Processo de Geração na PCH Fumaça:

O mapeamento do processo é uma ferramenta utilizada para se obter uma visualização gráfica das etapas de um processo. A partir dessa visualização, foi possível identificar pontos com potenciais de otimização e partir desses pontos foram propostas as possibilidades de otimização.

- Proposição de um sistema de controle:
- Validação do sistema:
- Análise dos Resultados:

2 CONCEITOS PERTINENTES

2.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas

Segundo (Flórez, 2014) as primeiras centrais de geração de energia elétrica eram hidráulicas de baixa potência. Essas usinas geravam sua energia em corrente contínua e eram utilizadas em sua maioria para iluminação pública. Devido as dificuldades de transmissão na época essas usinas se localizavam perto de centros urbanos, onde eram consumidas. Com o aparecimento da energia alternada e o consequente aumento da potências dessas usinas, em meados do século XX, haviam sido construídos diversas pequenas centrais hidrelétricas. Estas

centrais eram dirigidas por diversas empresas e conseqüentemente não havia um planejamento de crescimento unificado.

2.1.1 Princípio de Funcionamento

Segundo (Flórez, 2014), o processo de conversão de energia é dinâmico, a energia hidráulica é transformada pela turbina em energia mecânica, e esta, por sua vez, é transformada em energia elétrica através de um gerador para ser fornecida a demanda por meio de linhas de interligação.

O processo de conversão de energia é realizado mantendo-se constantes dois parâmetros elétricos, voltagem e frequência. Isso é possível devido a um regulador de tensão e um regulador de velocidade.

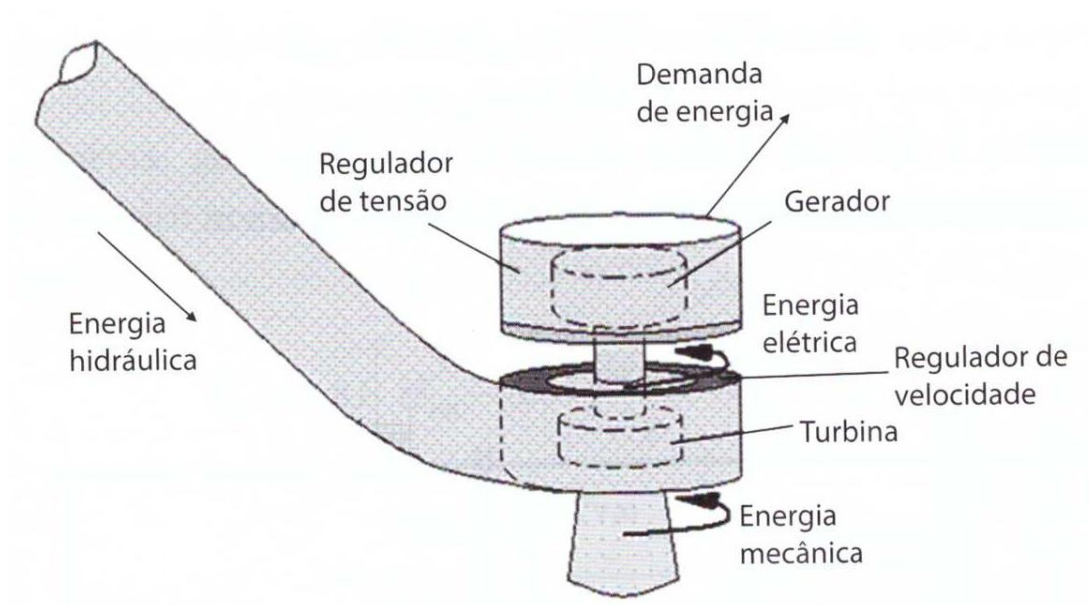


Figura 2-1 - Processo de conversão de energia hidráulica
Fonte: Pequenas Centrais Hidrelétricas – Ramiro Ortiz Flórez

2.1.2 Elementos que compõe a PCH

As Pequenas Centrais Hidrelétricas são compostas por diversos elementos, desde a captação da água no rio até a casa de força. A seguir serão descritos os elementos mais relevantes que compõem uma PCH.

- Tomada d'água: é a por onde se capta a vazão necessária para obter a potência hidráulica.

- Adução: é responsável pela condução da vazão da tomada d'água até a câmara de carga. Pode ser um canal, túnel ou até mesmo uma tubulação.
- Desarenador: É onde é retirado as partículas que não podem ser eliminadas na pré grade. Pode ser uma câmara desarenadora, onde é decantado as partículas em suspensão na água, ou uma válvula devidamente projetada.
- Câmara de carga: É onde se acopla os condutos forçados, suas dimensões devem garantir que não entre bolhas de ar nos condutos forçados, permitir o fácil arranque da unidade geradora e amortecer o golpe de aríete.
- Vertedouro: É por onde é vertida a vazão excedente que ocorre na tomada d'água.
- Condutos Forçados: é através deles que conduz a vazão captada na tomada d'água até a turbina.
- Casa de Força: é nela que se encontra o conjunto turbina-gerador, também denominado unidade geradora, encarregado de transformar a energia potencial em energia elétrica.

2.2 Estações Hidrométricas

A estação hidrométrica é uma instalação técnica que objetiva permitir o monitoramento:

- a) pluviométrico: dos dados de precipitação;
- b) limnimétrico: de dados do nível d'água do reservatório do aproveitamento hidrelétrico;
- c) fluviométrico: de dados do nível d'água, bem como medições de descarga líquida que permitam a definição e atualização da curva de descarga;
- d) sedimentométrico: de dados de sedimentos em suspensão e de fundo, que permitam determinar a descarga sólida total; e
- e) qualidade da água: o levantamento de parâmetros de qualidade da água.

(ANA, 2012)

2.2.1 Telemetria

São estações nas quais os dados são obtidos por sensores automáticos, com o auxílio de uma Plataforma de Coleta de Dados e transmitidos remotamente para um banco de dados. Cabe destacar que poderá ser utilizada uma mesma estação para coletar dados de chuva e nível da água em um determinado ponto de monitoramento. Essas estações são constituídas dos seguintes componentes:

- Fonte de energia;
- Datalogger;
- Sensores;
- Sistemas de transmissão;
- Infraestrutura.

(ANA, 2012)

2.3 Princípio de funcionamento da Geração hidráulica de Energia Elétrica

Segundo (Flórez, 2014), a energia hidráulica corresponde a um processo de converção de energia gravitacional, originado no fluxo da água por meio dos condutos forçados. Assim, a energia hidráulica fornecida a turbina equivale ao peso de água, G , deslocado no treco compreendido entre a seção de entrada e a saída dos condutos forçados, o que equivale a equação (1).

$$E_H = H_{est} \cdot G \quad (1)$$

Onde:

E_H - Energia Hidráulica;

H_{est} – Altura estática, equivalente a diferença do nível a Montante e do nível a Jusante;

G – Peso da água.

O peso da água é equivalente a equação (2).

$$G = \rho \cdot g \cdot V \quad (2)$$

Onde:

ρ – Densidade da água;

g – Força da Gravidade;

V – Volume.

O volume V equivale ao produto da vazão, Q , em uma magnitude de tempo, t , conforme equação (3).

$$V = Q \cdot t \quad (3)$$

De acordo com as equações (1) e (2), a energia hidráulica fornecida a turbina corresponde a:

$$E_H = H_{est} \cdot \rho \cdot Q \cdot t \quad (4)$$

A partir da equação (5), temos que a potência hidráulica é dada por:

$$P_H = \frac{E_H}{t} = H_{est} \cdot \rho \cdot Q \quad (5)$$

Se substituirmos os valores da densidade da água e da aceleração da gravidade, temos que a potência hidráulica total, em quilowatts, é dada por:

$$P_H = 9,81 \cdot H_{est} \cdot Q [kW] \quad (6)$$

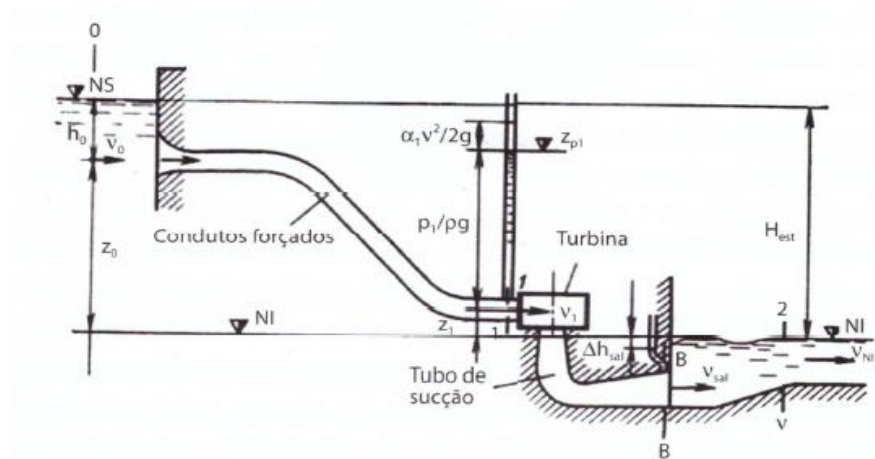


Figura 2-2 - Processo de conversão de energia
Fonte: Pequenas Centrais Hidrelétricas – Ramiro Ortiz Flórez

2.4 Perdas na Geração

A equação da potência hidráulica, não contabiliza as perdas presentes durante a conversão da energia hidráulica em energia elétrica. A seguir tem-se a descrição das perdas que acontecem durante o processo da conversão da energia.

Durante a transferência da potência hidráulica até a turbina existem perdas relacionadas a extensão e acessórios nos condutos forçados e as perdas pelo efeito do gradiente cinético nos condutos forçados. (Flórez, 2014)

O efeito do gradiente cinético nos condutos forçados refere-se a diferença de velocidades entre a tomada da água e o final dos condutos forçados.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Introdução

A Pequena Central Hidrelétrica de Fumaça fica localizada no município de Mariana em Minas Gerais. Essa usina faz o aproveitamento do potencial hídrico do Rio Gualaxo do Sul, pertencente a bacia do Rio Doce.

A PCH Fumaça tem uma potência instalada de 10,310 MW, soma das duas turbinas do tipo francis com potência nominal de 5,155 MW cada uma. Na Tabela 1 abaixo tem-se os dados técnicos da PCH Fumaça.

FICHA TÉCNICA - PCH FUMAÇA	
DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS	
VAZÕES CARACTERÍSTICAS Vazão Média de Longo Termo: 14,6 m³/s Vazão Firme 95%: 6,5 m³/s	Vazão Sanitária: 0,03 m³/s
VAZÕES EXTREMAS Vazão Máxima Observada: 242 m³/s Vazão Mínima Observada: 3,1 m³/s	Área de Drenagem do Barramento: 632 km²
TURBINAS	GERADOR
Tipo: Francis Quantidade: 2	Potência Nominal Unitária: 5,6 MVA Tensão Nominal: 6,9 kV

Potência Nominal Unitária: 5,155 MW	Rotação Nominal (rpm): 514,3
Vazão Nominal Unitária: 10,2 m³/s	Fator de Potência: 0,9
Rotação Síncrona: 400,0 rpm	Rendimento Máximo: 97,0 %
ESTUDOS ENERGÉTICOS	SISTEMA DE TRANSMISSÃO
Potência da Usina: 10,04 MW	Tensão: 69,0 kV
Queda Bruta Máxima: 57,4m	Extensão (km): ~ 0,8
Queda Líquida de Referência: 55,3 m	Local de Conexão: Ouro Preto-MG, diretamente na LT Brecha – Ouro Preto

Tabela 1- Ficha Técnica da PCH Fumaça

A PCH Fumaça é composta pelo lago de fumaça, com área inundada de 2,673 km², uma barragem com capacidade de regulação diária e uma casa de força, conforme Figura 3-1 abaixo.

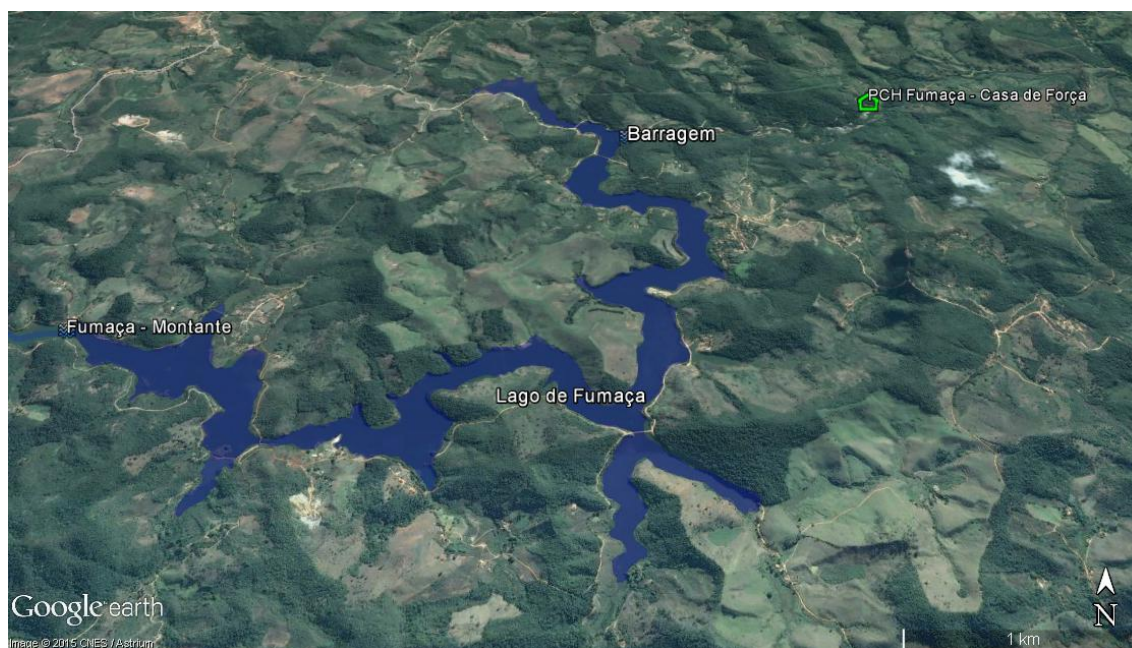


Figura 3-1- Disposição PCH Fumaça

A montante da PCH Fumaça, tem-se o Sistema Mainart, que é composto por três PCHs em cascata, PCH Cabolco, PCH Salto, PCH Funil, uma quarta usina a PCH Prazeres e dois reservatórios, a bacia do Custódio e a bacia do BRC. A disposição entre as usinas e os reservatórios está representada na Figura 3-2.

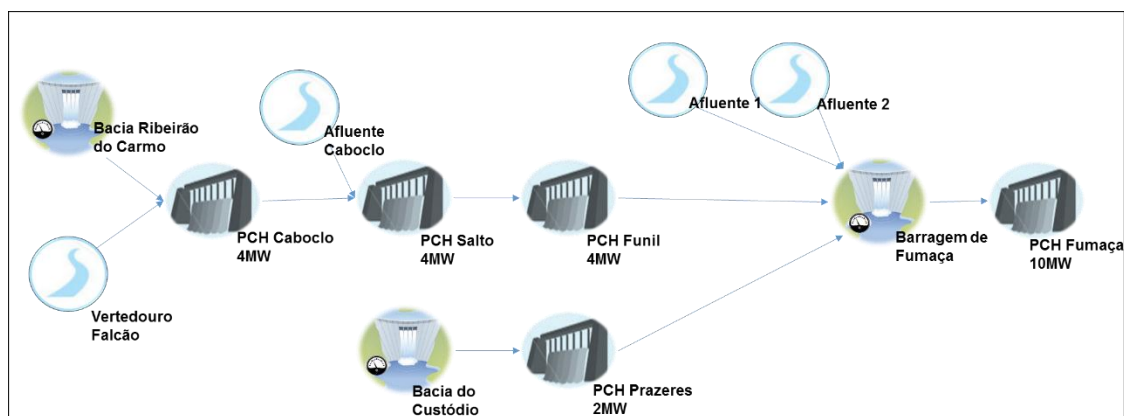


Figura 3-2- Diagrama Sistema Mainart

As usinas e o manejo dos reservatórios do Sistema Mainart são de responsabilidade da empresa Maynart Energética, a mesma que possui a PCH Fumaça. Portanto parte da vazão a montante da PCH Fumaça pode ser controlada, de acordo com a abertura das comportas das bacias do Custódio e do BRC. Isso é vantajoso para um estudo da operação em cascata dessas usinas.

Pode-se considerar a PCH Fumaça pertencente a um conjunto de PCHs em cascata, onde a PCH Fumaça encontra-se a jusante do Sistema Mainart, de acordo com o Figura 3-2. O trecho entre as PCHs Funil e Fumaça do rio Gualaxo do Sul tem uma distância de 25,514 km e pode ser visualizado na Figura 3-3. Essa configuração permite uma série de estudos hidrológicos com o objetivo da otimização da operação em conjunto dessas usinas, que vão além deste trabalho.

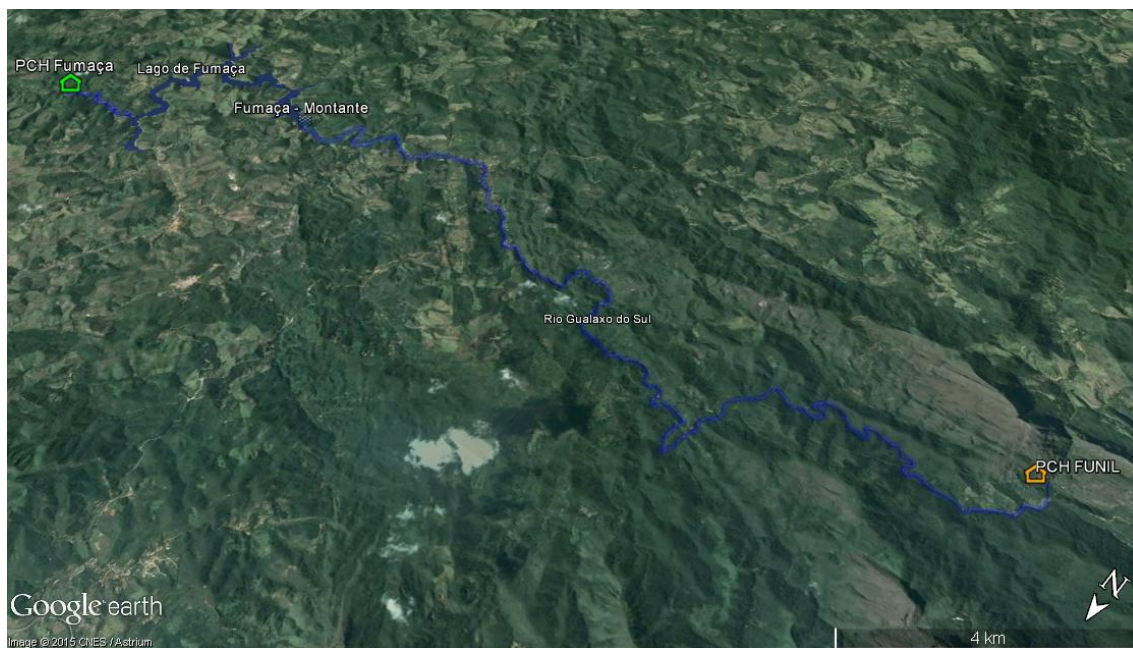


Figura 3-3- Trecho do Rio Gualaxo entre as PCH Funil e Fumaça

O estudo deste trabalho foi concentrado na PCH Fumaça devido ao sistema de monitoramento hidrológico existente nessa usina, além da configuração do sistema de usinas em cascata em que a PCH Fumaça está inserida. Dessa forma cria-se um cenário onde é possível realizar uma otimização da operação atual da PCH Fumaça com alta possibilidade de ganhos significativos sem grandes intervenções físicas na usina.

3.2 Sistema de Coleta de Dados

Para o desenvolvimento deste trabalho necessitou-se a coleta de uma série de informações hidrológicas para o estudo da forma de utilização dos recursos hídricos na PCH Fumaça. A maioria dessas informações são coletadas em estações de telemetria, denominadas estações hidrométricas.

A Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 03, de 2010, determina que os dados coletados pelos equipamentos automáticos e telemétricos deverão ser transmitidos para uma central de apoio, de responsabilidade das entidades operadoras das estações de monitoramento, em intervalos mínimos de 01 hora, onde deverão ser armazenados em uma base local, processados, qualificados e transmitidos para a ANA. (ANA, 2012)

A base de dados, supracitada, foi o que possibilitou a realização desse estudo.

As estações hidrométricas pertencentes a PCH Fumaça são, Estação Hidrométrica – Fumaça Montante, Fumaça Barramento e Fumaça Jusante e estão dispostas conforme Figura 3-4 abaixo.

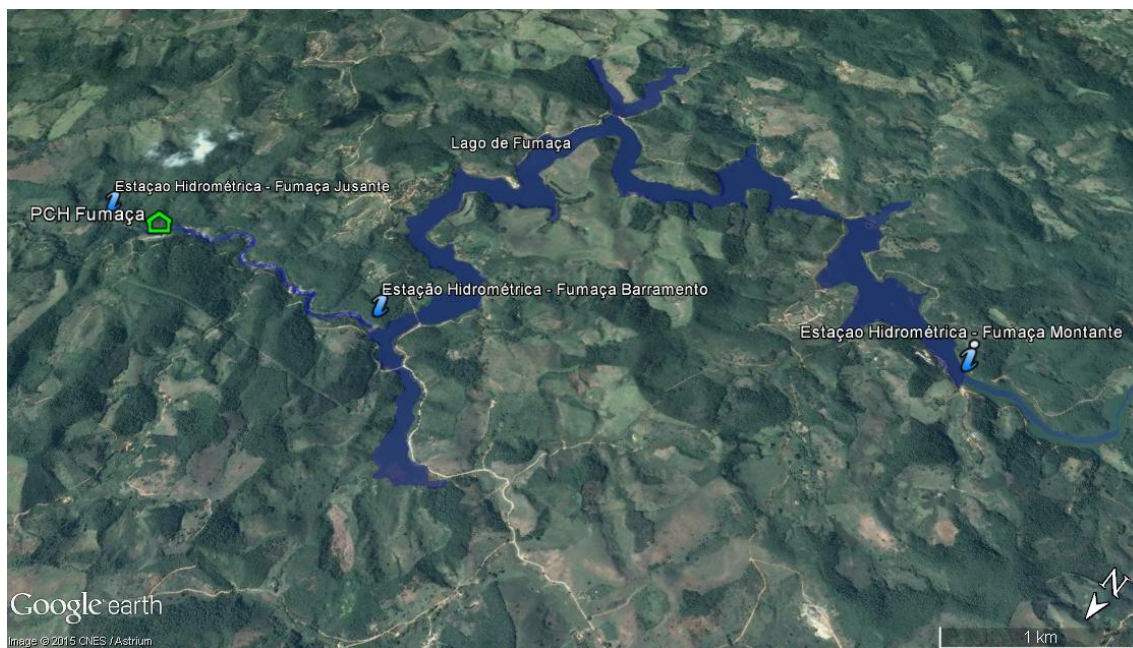


Figura 3-4- Estações Hidrométricas da PCH Fumaça

Também foram utilizados os dados da estação hidrométrica, Funil Jusante, com o objetivo de fazer um estudo da transferência de água entre as PCHs Funil e Fumaça.

Os principais componentes da Estação Hidrológica instalada são: Comunicador/Datalogger – Satélite/GPRS e acessórios; Sensor de Nível – Transdutor de pressão; Sensor de Chuva – Pluviômetro Digital; Sistema de Geração Solar com uma placa solar, uma bateria selada e um controlador de carga; Caixa a condicionadora em aço ambientalmente selada.

3.2.1 Estação Funil Jusante

A estação hidrométrica a jusante da Casa de Força da PCH Funil é a estação PCH Funil Jusante, representada na Figura 3-5, código 56212000, que controla as defluências das vazões turbinadas das usinas Prazeres e Funil, que se mesclam no Canal de Fuga, comum as duas usinas. Desta forma, a maneira de avaliar a vazão afluente a PCH Prazeres é mediante o monitoramento da saída do reservatório da Barragem do Custódio, que está sendo realizado pela estação PCH Prazeres Montante.

Na complementação do atendimento da resolução, ANA/ANEEL nº 03/2010, em agosto de 2014 foi instalada a telemetria, utilizando equipamentos da POLISAT, modelo completo, ou

seja, Estação Hidrológica tipo Plataforma de Coleta de Dados (PCD) para medição de pluviometria (Chuva) e fluviométrica (Nível e vazão – calculada a partir de curva-chave), com transmissão de dados via satélite/GPRS, alimentação gerada por energia solar e montada em caixa selada.



Figura 3-5 - Estação Hidrométrica PCH Funil Jusante

3.2.2 Estação Fumaça Montante

A estação a montante da barragem de Fumaça, PCH Fumaça Montante, foi instalada em atendimento a resolução ANA/ANEEL nº 03/2010. Na Figura 3-6 mostra essa estação hidrométrica.

Na complementação do atendimento da resolução, ANA/ANEEL nº 03/2010 foi instalada a telemetria, utilizando equipamentos da POLISAT, modelo completo, ou seja, Estação Hidrológica tipo PCD automática telemétrica para medição de pluviometria (Chuva) e fluviométrica (Nível e vazão – calculada a partir de curva-chave), com transmissão de dados via satélite/GPRS, alimentação gerada por energia solar e montada em caixa selada.



Figura 3-6 - Estação hidrométrica Fumaça Montante

3.2.3 Estação Fumaça Jusante

A estação a jusante da barragem, PCH Fumaça Jusante, foi instalada em 2002, inicialmente, na modalidade de operação fluviométrica convencional com o código 56230100, fornecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, órgão responsável na época pelo gerenciamento da rede hidrométrica nacional.

Na complementação do atendimento da resolução, ANA/ANEEL nº 03/2010, no dia 22/01/14 foi instalada a telemetria, utilizando equipamentos da POLISAT, modelo completo, ou seja, Estação Hidrológica tipo PCD automática telemétrica para medição de pluviometria (Chuva) e fluviométrica (Nível e vazão – calculada a partir de curva-chave), com transmissão de dados via satélite/GPRS, alimentação gerada por energia solar e montada em caixa selada.



Figura 3-7 - Estação Hidrométrica Fumaça Jusante

3.2.4 Estação Fumaça Barramento

As réguas limnimétricas foram instaladas em janeiro de 2014 e telemetria em abril do mesmo ano, junto à parede lateral da margem esquerda do vertedor, próxima à tomada d'água, conforme se mostra na Figura 3-8.

O nivelamento das réguas foi feito, partindo da cota do RN-01 (4,998 m) no piso do pórtico das comportas da tomada d'água, este valor tem como referência o “zero das réguas”.

Na complementação do atendimento da resolução, ANA/ANEEL nº 03/2010, foi instalada a telemetria, utilizando equipamentos da POLISAT, modelo completo, ou seja, Estação Hidrológica tipo PCD automática telemétrica para medição de pluviometria (Chuva) e fluviométrica (Nível e vazão – calculada a partir de curva-chave), com transmissão de dados via satélite/GPRS, alimentação gerada por energia solar e montada em caixa selada.



Figura 3-8 - Estação Hidrométrica Fumaça Barramento

3.2.5 Dados de Geração

Os dados de geração da PCH Fumaça que foram utilizados nesse trabalho, são registrados de hora em hora pelos operadores da usina.

3.3 Estudos Hidrológicos

“A área de drenagem de uma bacia é a projeção em um plano horizontal da superfície contida entre seus divisores topográficos. É obtida através de planimetria clássica ou processos computacionais, em plantas de localização, e expressa, comumente, em km² ou ha.” (ELETROBRAS, 2015)

A PCH Fumaça possui uma área total de drenagem de 632 km², dos quais 372 km² estão a montante da PCH Funil, restando 257 km² como área incremental. O fato de 59% da área de drenagem da PCH Fumaça está a montante da PCH Funil, gera uma vantagem para esse estudo. Pois pode-se prever a vazão montante do lago de Fumaça, com algumas horas de antecedência, com os dados da estação hidrométrica, a jusante, da PCH Funil. Na Figura 3-9 tem-se a demarcação da área de drenagem da PCH Fumaça.

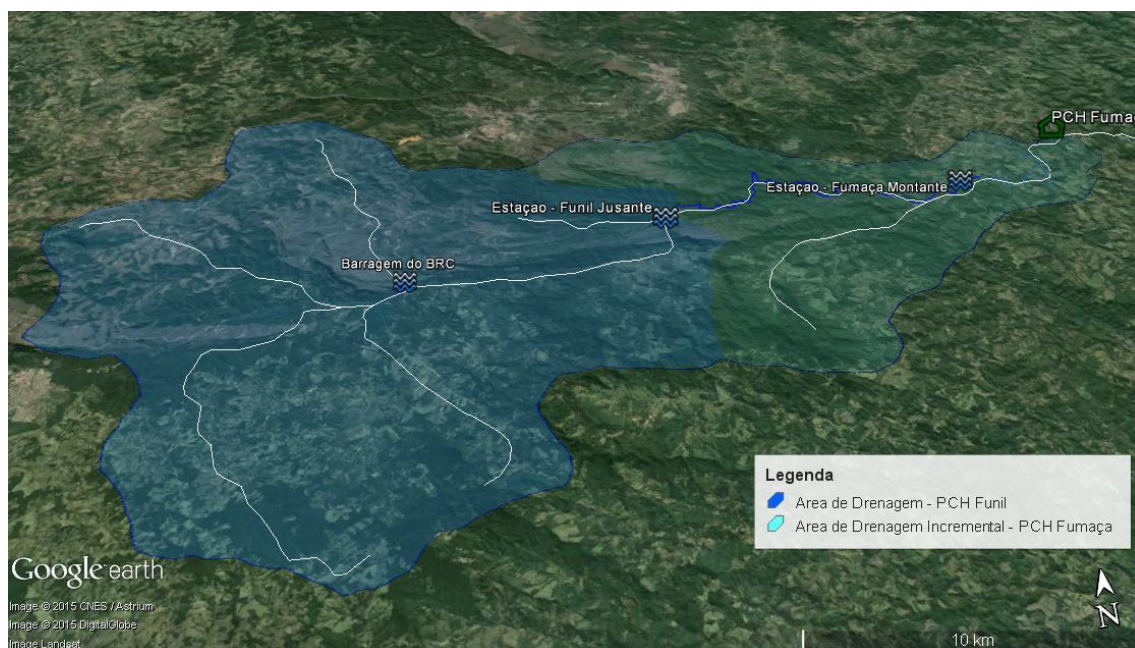


Figura 3-9- Área de drenagem PCH Fumaça

A água drenada na área de drenagem pertencente a PCH Funil segue até o lago de Fumaça através do rio Gualaxo. A distância entre as estações hidrométricas, PCH Funil Jusante e PCH Fumaça Montante, é de aproximadamente 25,5 km. Essa informação foi obtida através do software “Google Maps”, como pode ser observado na Figura 3-3- Trecho do Rio Gualaxo entre as PCH Funil e Fumaça.

3.3.1 Tempo de percurso entre as Estações Funil Jusante e Fumaça Montante

Para a previsão da vazão a montante do lago de Fumaça, foi necessário realizar um estudo para determinar o tempo médio do percurso entre as estações Funil Jusante e Fumaça Montante. Nesse estudo foi analisado uma serie temporal da estação Funil Jusante e identificado grandes variações na vazão. Durante esses estudos pode-se comprovar que as grandes variações na vazão estavam ligadas a chuvas a montante da PCH Funil, registradas em postos pluviométricos. A partir daí, foi realiza uma seleção de ocorrências das maiores chuvas, a Tabela 2, mostra as ocorrências de chuvas selecionadas.

Tabela 2- Ocorrências de Chuvas Estação Hidrométrica Funil Jusante

Hora	Funil Jusante		
	Pluv. [mm]	Vazão [m³/s]	Nível [cm]
26/2/15 17:00	49,00	22,8233	110
1/2/15 2:00	22,00	5,2415	34
3/2/15 17:00	18,50	4,2052	27
18/2/15 20:00	17,00	3,1497	19
21/3/15 5:00	16,25	2,1307	10
10/3/15 5:00	16,00	4,7846	31
26/2/15 16:00	15,50	2,4502	13
8/3/15 6:00	14,50	5,5566	36
25/2/15 17:00	12,75	1,6439	5
23/3/15 6:00	12,75	3,6601	23
23/3/15 7:00	12,75	3,6601	23
5/2/15 22:00	12,50	4,0657	26
30/1/15 16:00	12,00	2,9077	17
1/3/15 4:00	11,00	3,2740	20

A partir das ocorrências de chuvas, foi selecionado um período de aproximadamente um dia e meio, antes e depois, da ocorrência e coletado os dados de vazão das estações Funil Jusante e Fumaça Montante desse período. Com posse desses dados pode-se então analisar a diferença do tempo entre os picos e vales na série histórica desses dados, com o objetivo de definir o tempo gasto no percurso entre as estações. No Gráfico 3-1 abaixo, tem-se sinalizado os pontos de vales e picos das series históricas de ambas estações e a partir deles pode-se concluir que a diferença de tempo entre esses dados marcados é de 4 horas.

3.3.2 Área de drenagem Incremental da PCH Fumaça

Entre as estações Funil Jusante e Fumaça Montante, ainda há como contribuinte, na vazão da estação Fumaça Montante, uma área de drenagem de 257 km². Na Figura 3-10, abaixo, pode-se a área referente a área de drenagem incremental da PCH Fumaça.

A influência de toda a chuva nessa área, só pode ser prevista através de previsões meteorológicas, ou quando toda essa água já estiver chegando a montante no lago de Fumaça.

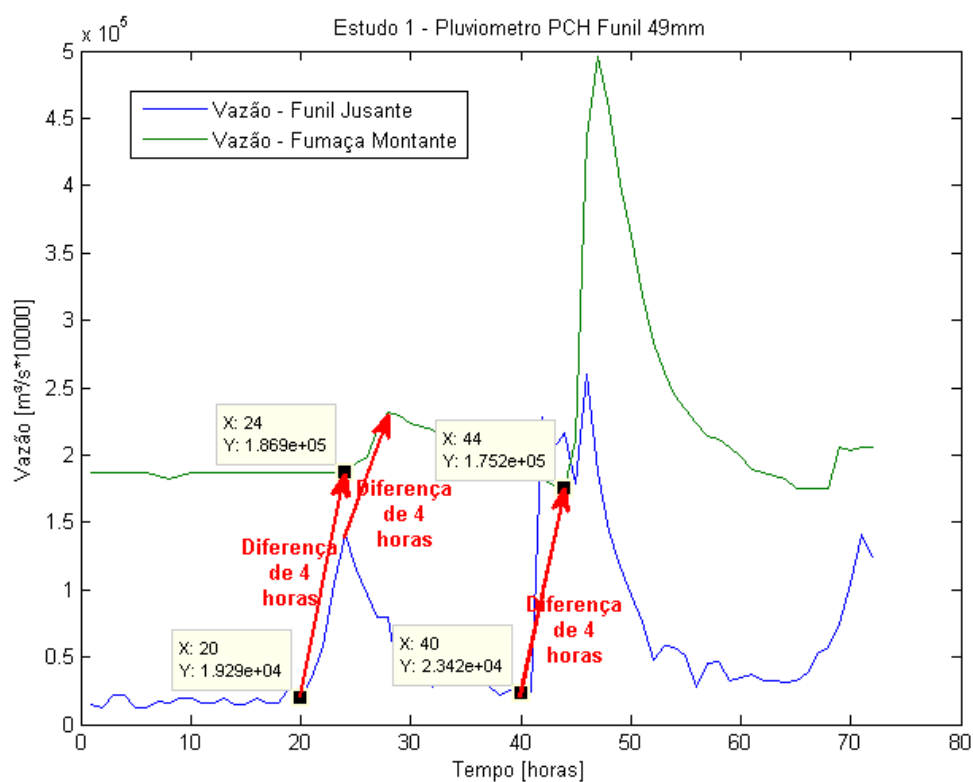


Gráfico 3-1- Transferência de água - Funil Jusante - Fumaça Montante

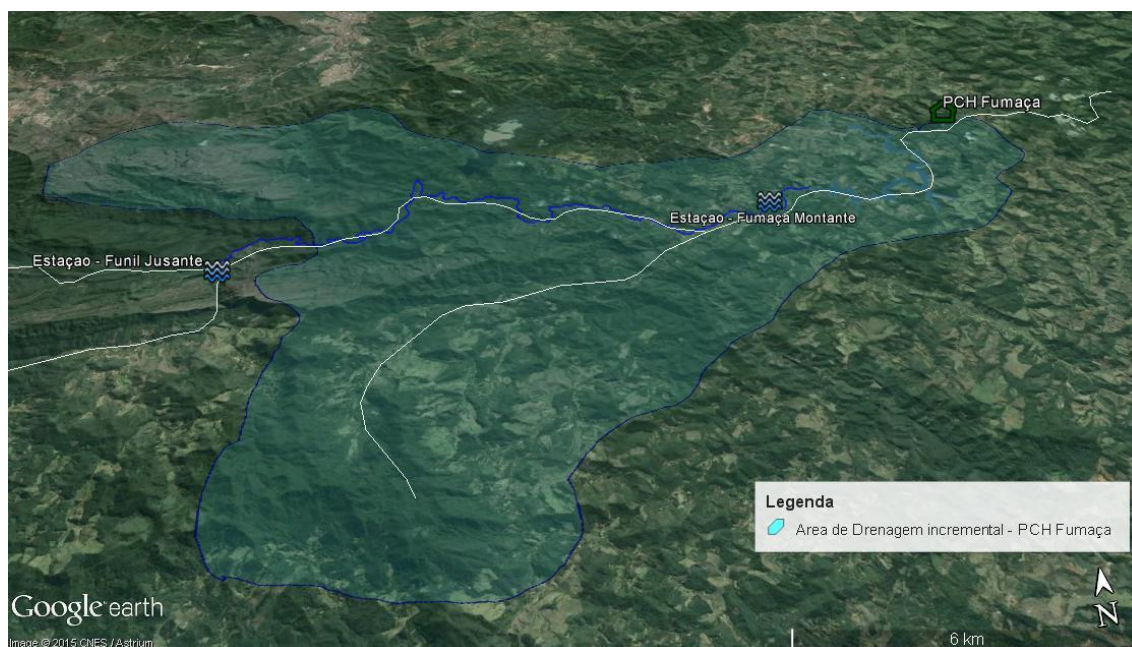


Figura 3-10- Afluente Rio Gualaxo - Entre Estações Funil Jusante e Fumaça Montante

3.3.3 Curva Cota X Área do Lago

Para determinar o volume de água acumulado em uma barragem é utilizado a curva cota x área x volume. Através de estudos hidrológicos pertencentes a PCH Fumaça, foi obtido a Tabela 3 com os dados de Cota x Área, abaixo. A partir desses dados, pode-se realizar uma interpolação, gerando uma equação genérica para a determinação da área para qualquer cota. O resultado da interpolação está plotado no Gráfico 3-2.

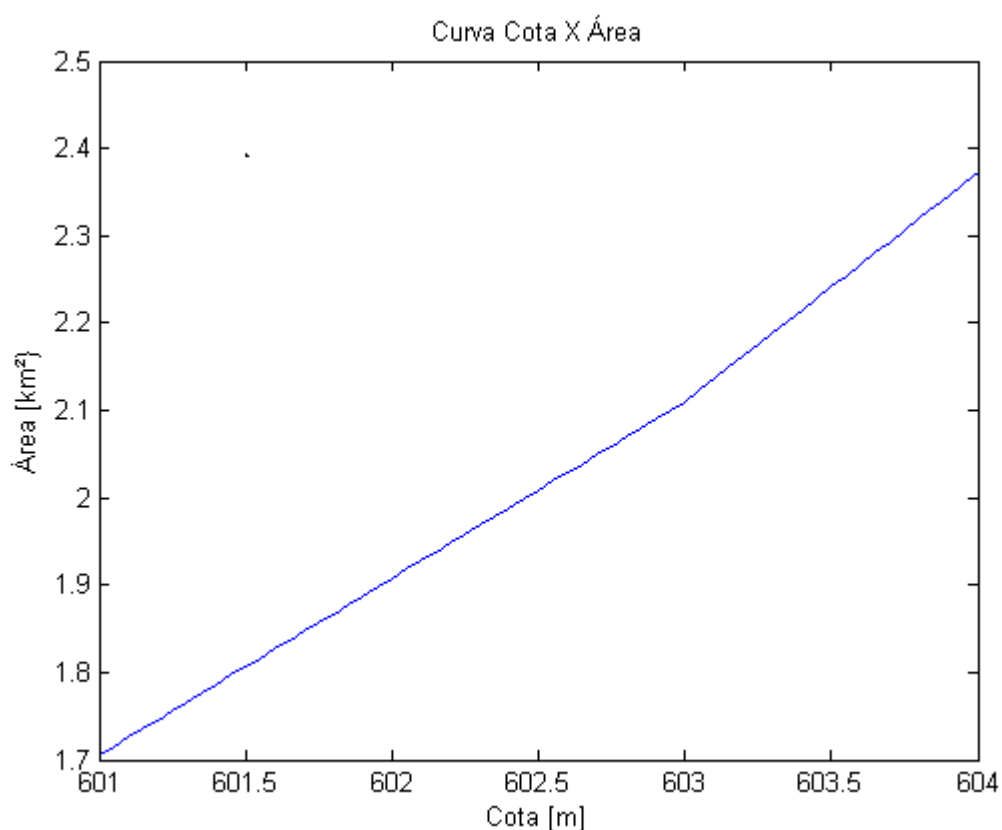


Gráfico 3-2- Curva Cota X Área

Tabela 3- Curva Cota X Área X Volume

Curva Cota x Área x Volume		
Cota (m)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)
579	0,020	0,000
580	0,002	0,001
585	0,031	0,080
590	0,258	0,663
595	0,746	3,146
600	1,503	8,643
603	2,110	14,062
608	3,420	27,887

3.3.4 Modelagem Matemática do Lago de Fumaça

A modelagem matemática do lago de Fumaça tem como finalidade possibilitar futuras simulações de diversos cenários e assim estudar o comportamento do lago a fim de estabelecer uma malha de controle do mesmo.

Para esse trabalho, está sendo considerado um fundo de escala de uma hora devido aos dados hidrológicos disponíveis.

A modelagem, envolve determinar todas as variáveis que influem no comportamento do lago, bem como determinar como elas se interagem. De acordo com as leis de conservação de massa, a equação para a variação no volume de água no lago de fumaça é definida como:

$$dV_{lago} = V_{afluente} - V_{efluente} \quad (7)$$

Onde:

dV_{lago} – Variação de água no lago de fumaça;

$V_{afluente}$ – Volume de água que está chegando ao lago;

$V_{efluente}$ – Volume de água que está deixando o lago.

Sabe-se ainda que:

$$V_{afluente} \left[\frac{m^3}{h} \right] = Q_m \left[\frac{m^3}{s} \right] * 3600 \quad (8)$$

e,

$$V_{efluente} \left[\frac{m^3}{h} \right] = Q_j \left[\frac{m^3}{s} \right] * 3600 \quad (9)$$

Onde:

$Q_m \left[\frac{m^3}{s} \right]$ – Vazão Fumaça Montante;

$Q_j \left[\frac{m^3}{s} \right]$ – Vazão Fumaça Jusante.

A partir das equações (8) e (9), temos que:

$$dV_{lago} \left[\frac{m^3}{h} \right] = \left(Q_m \left[\frac{m^3}{s} \right] - Q_j \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) * 3600 \quad (10)$$

A partir dos estudos do Tempo de percurso entre as Estações Funil Jusante e Fumaça Montante, pode-se concluir que a vazão a montante do lago de fumaça, $Q(i)_m$, é definida pela equação abaixo:

$$Q(i)_m = Q(i - 4)_{Funil Jusante} + Q_{Area Incremental}(i) \quad (11)$$

Onde,

$Q(i)_{Area Incremental}$: Vazão no instante, i, que pode ser disponibilizada através do serviço de previsão do tempo;

$Q(i - 4)_{Funil Jusante}$: Vazão prevista para chegada no instante i.

A informação do volume de água presente no reservatório é obtida através da cota, ou nível do lago e é expressa na equação (12) abaixo.

$$V_a = h * A(h) \quad (12)$$

Onde:

V_a – Volume Armazenado;

h - Cota ou nível do lago;

$A(h)$ – Curva Cota X Area.

3.3.5 Conclusão

Devido as características da disposição das PCHs Fumaça e Funil, pode-se obter uma previsão real de parte da variação da vazão a montante no lago de Fumaça com pelo menos quatro horas de antecedência. Esse fato gera uma vantagem para o controle de nível da barragem, pois com isso pode-se prever o nível do lago em 4 horas de antecedência e caso seja necessário realizar uma preparação para o reservatório para evitar vertimento isso pode ser feito.

Ainda pode-se obter previsões diárias, semanais e mensais através de serviços meteorológicos e utilizar os dados reais obtidos para o aprendizado do sistema de previsão de vazão. Com isso pode-se ter um tempo de preparação do lago para receber uma certa quantidade de água.

3.4 Modelagem da PCH Fumaça

Em geral uma PCH é constituída por um reservatório com pequena capacidade de armazenamento ou acumulação. Esses reservatórios possuem cotas, ou níveis monitorados no barramento da usina, máximas e mínimas. (BOURGES, 2009)

São determinadas pela altura do barramento, a cota máxima e por restrições ambientais a cota mínima. No caso da cota máxima, ao se exceder esse limite parte da água que poderia ser armazenada para a transformação em energia elétrica é perdida através do vertimento.

O vertimento é a passagem da água por cima do barramento, situação em que ocorre uma perda muito grande de água, pois essa água não passa pelas unidades geradoras da usina. Situação essa que deve ser evitada ao máximo na operação de uma usina hidrelétrica.

3.4.1 Vazão Turbinada

A vazão a jusante da usina é composta por duas outras variáveis importantes na modelagem do sistema de geração da usina, que são a vazão sanitária e a vazão turbinada.

$$Q_j = Q_s + Q_t \quad (13)$$

Onde:

Q_j – Vazão a Jusante da PCH Fumaça;

Q_s – Vazão Sanitária;

Q_t – Vazão Turbinada.

A vazão sanitária é a vazão mínima que deve se manter no curso natural do rio, entre o barramento e a casa de força. Essa vazão é determinada após estudos ambientais. Neste estudo essa vazão será considerada nula, por ser uma vazão insignificante. Dessa forma temos que:

$$Q_j = Q_t \quad (14)$$

A vazão turbinada é a vazão que é aproveitada para a conversão da energia potencial e cinética da água em energia elétrica pelas unidades geradoras da usina.

3.4.2 Altura da Coluna D'Água

A altura líquida, ou altura da coluna d'água, é a diferença entre o nível altimétrico da água no barramento e o nível altimétrico no eixo da turbina.

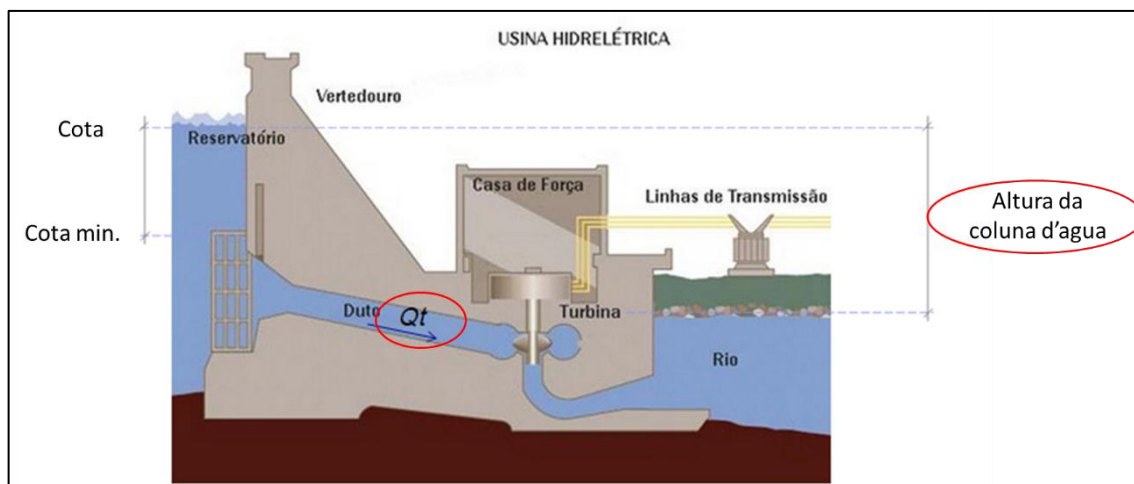


Figura 3-11 - Representação da Central Hidrelétrica
Fonte: (VIEIRA, 2007)

3.4.3 Função de Geração

A função de geração é determinada a partir da relação entre as variáveis, altura da coluna d'água, h , em metros, e vazão turbinada, em m^3/s , através da equação (15) abaixo. A função geração retorna à potência nominal, em quilowatts [kW]. A função da geração é a potência que poderia ser gerada se não houvessem perdas nas unidades geradoras.

$$P_{\text{nominal}}[\text{kW}] = 9,81 \times Q_t \times h \quad (15)$$

Onde:

9,81 – Aceleração da Gravidade;

Q_t – Vazão Turbinada em m^3/s ;

h - Altura da coluna d'água em metros.

3.4.4 Índice de eficiência das unidades geradoras

A partir da potência nominal, pode-se obter o índice de eficiência da unidade geradora. O índice de eficiência, k , da unidade geradora é a relação entre a potência nominal e a potência real. O índice de eficiência é a soma de todas as perdas de geração da unidade geradora, e inclui as perdas hidráulicas, perdas pela elevação do nível jusante, perda pela variação de rendimento do conjunto turbina-gerador e perdas elétricas.

Para a determinação do índice de eficiência das unidades geradoras nesse trabalho, foram considerados uma serie de dados em que não houvessem registros de chuvas em nenhuma das estações hidrométricas, com o objetivo de eliminar possíveis interferências nos dados. O período selecionado compreende os dados horários entre os dias 08 de dezembro de 2014 a 29 de dezembro de 2014, com um total de 394 amostras.

No Gráfico 3-3 está plotado a potência nominal, gerado através da equação (15) a partir dos dados da altura da coluna d'água e da vazão a jusante da casa de força da PCH de Fumaça e a potência real, registrada pelos operadores da PCH Fumaça. Ambos os dados estão em uma mesma referência de tempo.

Como pode ser observado no Gráfico 3-3 abaixo, o comportamento das duas funções é equivalente, comprovando as equações supracitadas.

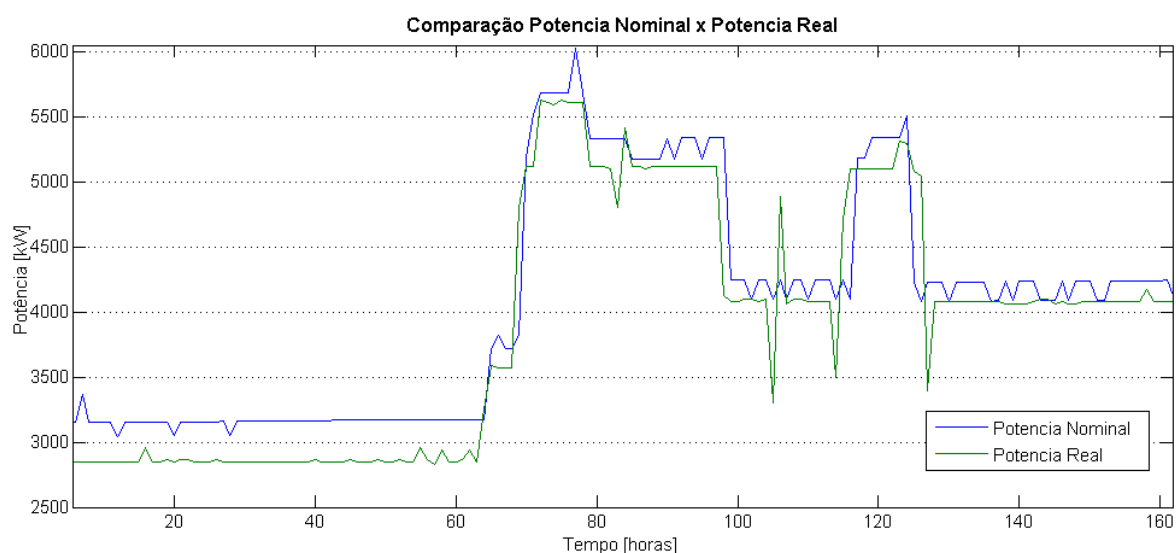


Gráfico 3-3- Comparação Potencia Nominal X Potencia Real

Para se obter o índice de eficiência da unidade geradora da PCH Fumaça, foi necessário realizar uma filtragem logo após a relação entre a Potência Nominal e a Potência Real, devido a inconsistência de alguns dados. Essa filtragem foi realizada, retirando-se alguns valores que não pertenciam a primeira distribuição normal, esses valores estão sinalizados no Gráfico 3-4.

Como pode ser observado no Gráfico 3-5, o maior índice de ocorrência da eficiência das unidades geradoras é o 0.96, correspondente a 96% de eficiência confirmando os dados

nominais da unidade geradora. A média obtida na série de dados da eficiência da unidade geradora é de 0.92, ou seja, 92%.

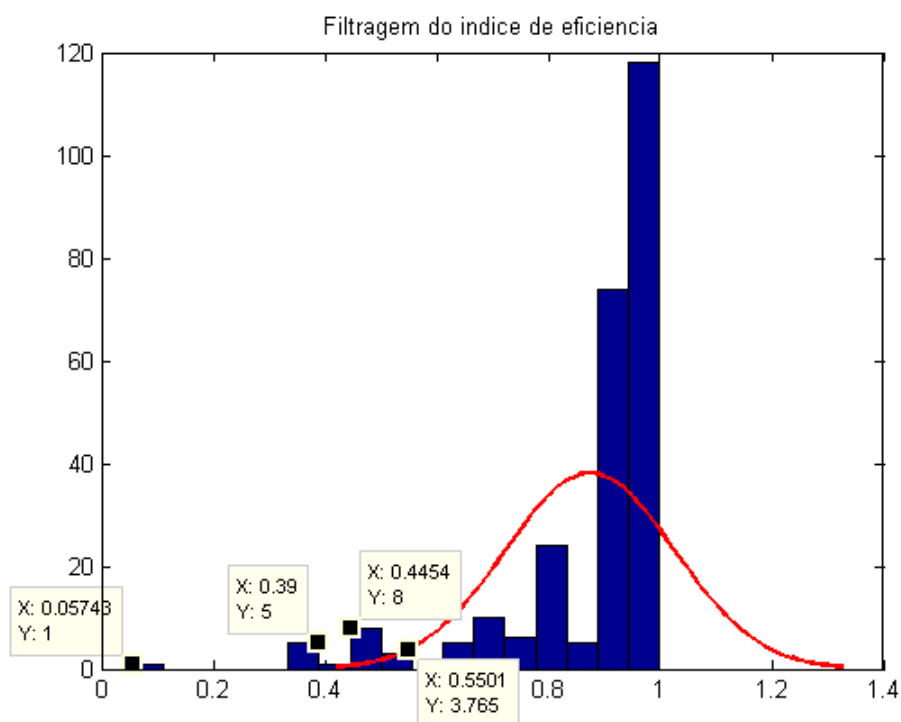


Gráfico 3-4- Filtragem do índice de eficiência

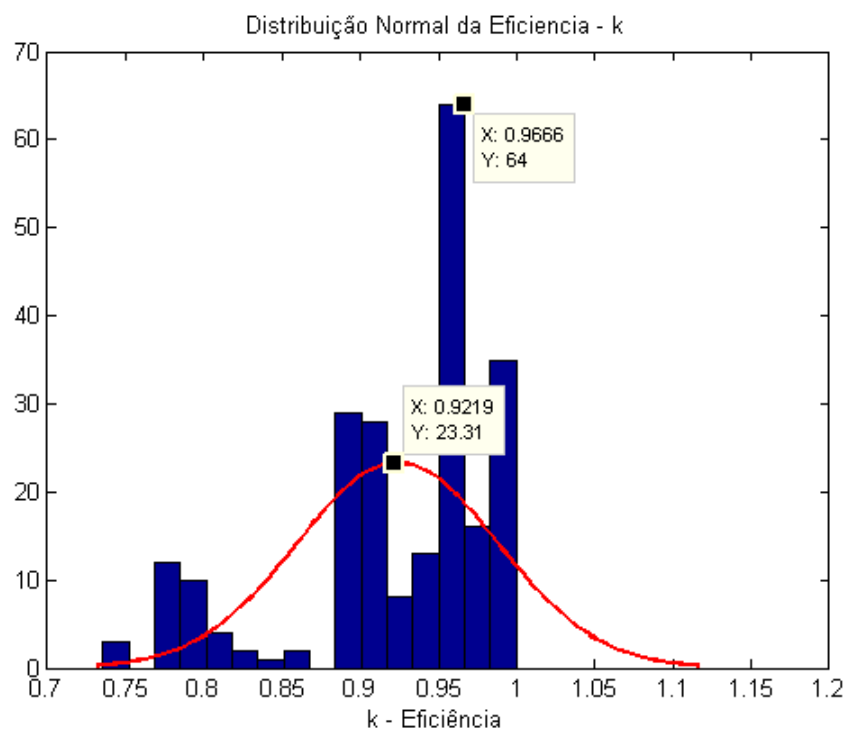


Gráfico 3-5 - Distribuição normal da eficiência das unidades geradoras da PCH Fumaça

3.4.5 Potência Efetiva

A Potência efetiva é a função de geração que reproduz o sistema de geração da unidade geradora da usina e ela pode ser obtida a partir da aproximação da potência nominal da potência real. A potência efetiva é definida conforme a equação (16), abaixo.

$$P_e[kW] = k_{med} \times 9,81 \times Q_t \times h \quad (16)$$

Onde:

P_e - Potência Efetiva em Quilowatts;

k_{med} - É a média do índice da eficiência.

No Gráfico 3-6, abaixo, pode-se comparar a Potência efetiva em relação a Potência Real.

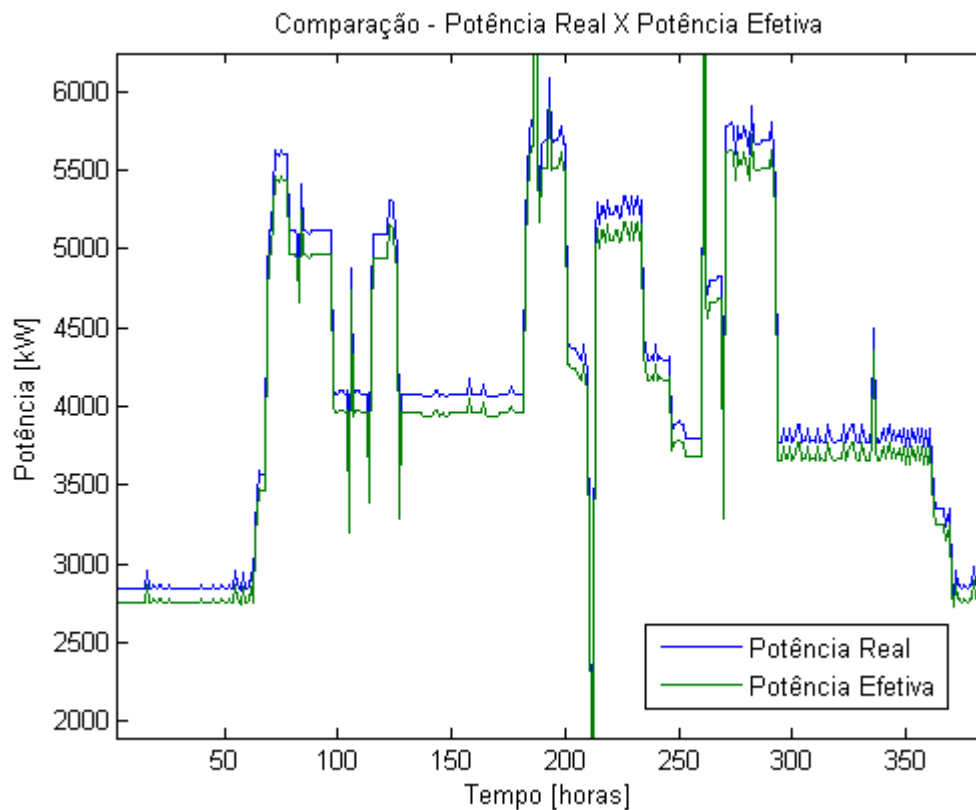


Gráfico 3-6- Comparação Potência Real X Potência Efetiva

Dessa forma a Potência Efetiva se torna uma equação que pode ser utilizada com segurança na simulação do sistema proposto nesse trabalho.

3.5 Análise da Operação Atual da PCH Fumaça

3.5.1 Parâmetros de Operação

Como pode ser observado na equação (15) existem duas variáveis que compõe a função de geração, que são elas a vazão turbinada e altura da coluna d'água. A vazão turbinada corresponde ao volume de água que passa pela turbina enquanto quanto maior for a altura d'água menor será o volume gasto. Portanto quanto maior for o nível no barramento, aumentando assim a coluna d'água, maior será a geração de energia com um menor volume de água, ou seja, haverá uma economia de água para gerar um mesmo montante de energia elétrica. No Gráfico 3-7 abaixo, tem-se a variação da cota na barragem da PCH Fumaça durante o período de 01/06/2014 a 01/06/2015.

3.5.2 Vertimento

O vertimento é quando o nível do lago ultrapassa o limite máximo da barragem, ocasionando a passagem da água por cima da barragem. Durante o projeto da barragem essa situação é prevista, para a própria segurança da barragem.

Durante o vertimento é onde ocorre uma perda muito grande de água, pois não se pode aproveitar nada da água que passa por cima da barragem. No Gráfico 3-8, está destacado de vermelho os momentos em que ocorreram vertimento no período de junho de 2014 a junho de 2015.

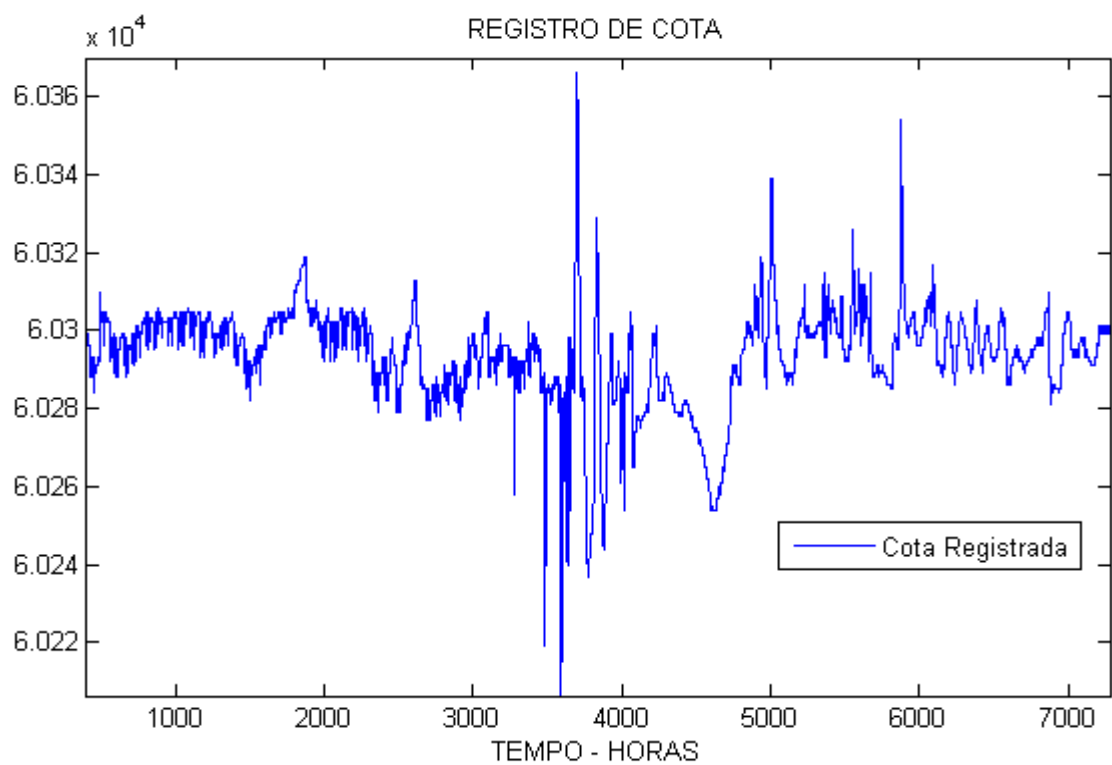


Gráfico 3-7 - Cota Registrada 01/06/2014 a 01/06/2015

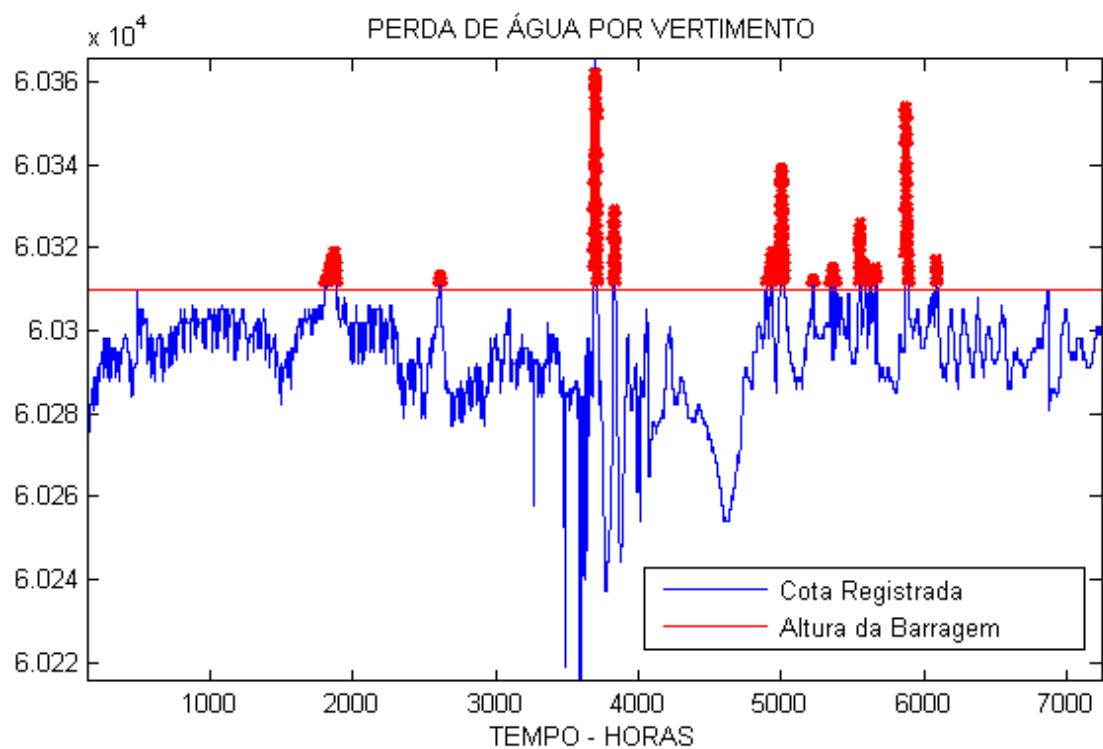


Gráfico 3-8- Perda de água por vertimento

3.5.2.1 Calculo do Volume Vertido

Existem diversas formas para determinar a vazão de escoamento por um vertedouro, mas segundo (Neves, 1979) e (PINTO, 2011) as mais utilizadas na pratica são as formulas de Francis e Bazin.

Segundo (Neves, 1979), a fórmula de Bazin é válida para cargas hidráulicas que estejam entre 0,1m e 0,6m. Como a maior cota de vertimento registrada é de 0,56m aplicou-se a formula de Bazin para esse cálculo. A formula de Bazin é expressa por:

$$Q = \left(0,405 + \frac{0,003}{H}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H+P}\right)^2\right] \cdot LH \cdot \sqrt{2gH} \quad (17)$$

Onde:

Q = vazão de escoamento no vertedor, em m³/s,

H = carga hidráulica existente no vertedor, medida em metros,

P = altura da soleira do vertedor, medida em metros,

L = largura do vertedor, dada em metros,

g = aceleração da gravidade, em m/s².

Através da vazão de vertimento, pode-se obter a quantidade total de agua perdida através da formula abaixo.

$$V_v = Q_v \cdot T_v \quad (18)$$

Onde:

V_v – Volume vertido;

Q_v – Vazão de Vertimento;

T_v – Tempo de Vertimento.

3.5.2.2 Estudo individual do Vertimento

Para a análise da viabilidade técnica de preparação do lago para evitar o vertimento, foi necessário o estudo individual de algumas situações em que ocorreram o vertimento. O resultado dessa análise é a quantidade de água vertida, a energia deixada de ser gerada e a alteração máxima na altura do lago que deveria ter sido feita para o aproveitamento da água perdida.

No período de junho de 2014 a junho de 2015 houveram doze situações em que ocorreu vertimento. Foram selecionados seis desses eventos em que ocorreram vertimento para análise.

No Gráfico 3-9 abaixo, tem-se o vertimento em que houve a maior perda de água. Os resultados do estudo desse vertimento estão expressos na Tabela 4. Considerando a área do lago para uma cota de 603,00m, nesse vertimento, se o lago tivesse sido preparado reduzindo-se 0,6m na cota do barramento antes do início da enchente este vertimento não teria ocorrido.

Tabela 4 - Resumo vertimento maior perda de água

VOLUME DE ÁGUA NÃO APROVEITADO =	2773700 m ³
GERAÇÃO PERDIDA =	399 MW
ALTURA MÁX. A SER AJUSTADA NO LAGO =	0,6 m

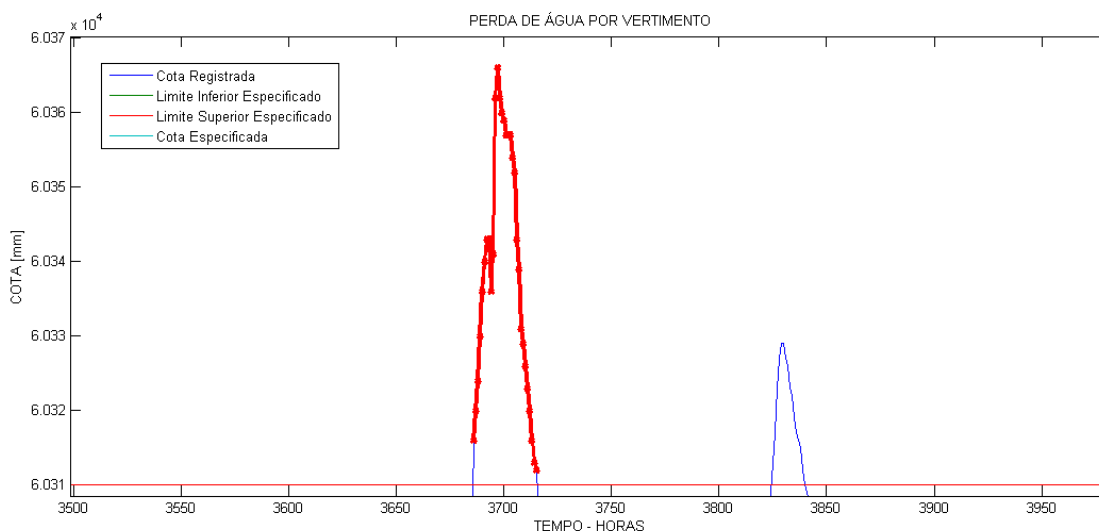


Gráfico 3-9- Estudo individual maior perda de água em vertimento

Na Tabela 5 tem-se o resumo do resultado das análises individuais de algumas situações onde ocorreram vertimento e como pode-se observar a altura, a ser alterada no lago para a preparação do mesmo para receber uma quantidade extra de água, é relativamente pequeno enquanto o ganho na geração pode ser muito alto.

Tabela 5- Análise individuais de situações onde ocorreram vertimento

ESTUDO	VOLUME DE AGUA VERTIDO [m³]	GERAÇÃO PERDIDA [MW]	ALTURA DE PREPARAÇÃO DO LAGO [m]
VERTIMENTO 1	560.230	80,6	0,1
VERTIMENTO 2	2.773.700	399	0,6
VERTIMENTO 3	329.860	47,5	0,2
VERTIMENTO 4	154.290	22,2	0,1
VERTIMENTO 5	1.290.300	185,7	0,3
VERTIMENTO 6	1.767.900	254,4	0,5

3.5.2.3 Conclusão

Durante o período de junho de 2014 a junho de 2015 o volume total vertido foi de **7.308.091 m³** de água, o que poderia gerar **1014 MW** considerando a altura da coluna d'água para a cota especificada de 603,00.

Ainda pode-se observar nas análises individuais de cada situação onde ocorreu o vertimento que não houve uma prévia preparação do lago para o recebimento dessas águas. Geralmente a usina chega a carga máxima quando o vertimento já está acontecendo.

Pode-se perceber também que a variação no nível do lago na barragem é relativamente pequeno enquanto pode-se obter um grande volume de geração. O que indica uma viabilidade técnica para a metodologia proposta nesse trabalho.

3.6 Metodologia Proposta

Com base no estudo da operação da PCH Fumaça, este trabalho propõe uma metodologia integrada a um sistema de controle para uma operação otimizada desta usina. Esta operação otimizada compreende na economia da água em duas etapas, a primeira é a especificação dos parâmetros operacionais da coluna d'água e a segunda consiste no constante preparo do lago para ocorrência de chuvas e enchentes visando dessa forma evitar qualquer vertimento.

O sistema de controle para a operação consiste no controle do nível de água no barramento da usina, utilizando dos dados a montante do lago para a previsão, com algumas horas de antecedência, do nível do lago. Com a previsão de algumas horas do nível do lago pode-se tomar ações preventivas para evitar o vertimento de água ou a alteração brusca no nível especificado.

3.6.1 Especificação dos parâmetros operacionais

De acordo com a função de geração, quanto maior for a altura da coluna d'água maior é a eficiência da unidade geradora. Ou seja, quanto maior for o nível do lago maior será a eficiência da unidade geradora. Porém ao se deixar um nível muito alto na barragem, a probabilidade de um vertimento, caso chegue uma quantidade de água inesperada a montante do lago aumenta. Mas devido as características de localização da PCH Fumaça, tem-se uma vantagem da previsão com quatro horas de antecedência da vazão a montante do lago. Essa característica se torna ainda mais vantajosa pois a montante da estação Funil Jusante, onde se faz a previsão da vazão a montante do lago de Fumaça, tem-se 59% da área de drenagem da PCH Fumaça. Portanto pode-se ter uma previsão real, com até quatro horas de antecedência, de precipitações em 59% da área de drenagem da usina.

Além da previsão real, da vazão a montante do lago de Fumaça, é proposto neste trabalho o monitoramento da previsão local da vazão do rio Gualaxo do Sul, para que se possa preparar o lago para maiores chuvas e conseqüentemente maiores vazões.

Devido as vantagens supracitadas em relação a previsão do nível do lago, neste trabalho é proposto um nível de operação para a cota 603,00 com um limite superior de 603,10 e limite inferior de 603,00. No Gráfico 3-10 tem-se a comparação da cota do lago no período de

19/05/14 15:00 a 28/11/14 15:00 em relação a cota especificada, contando com um total de 2.178 amostras.

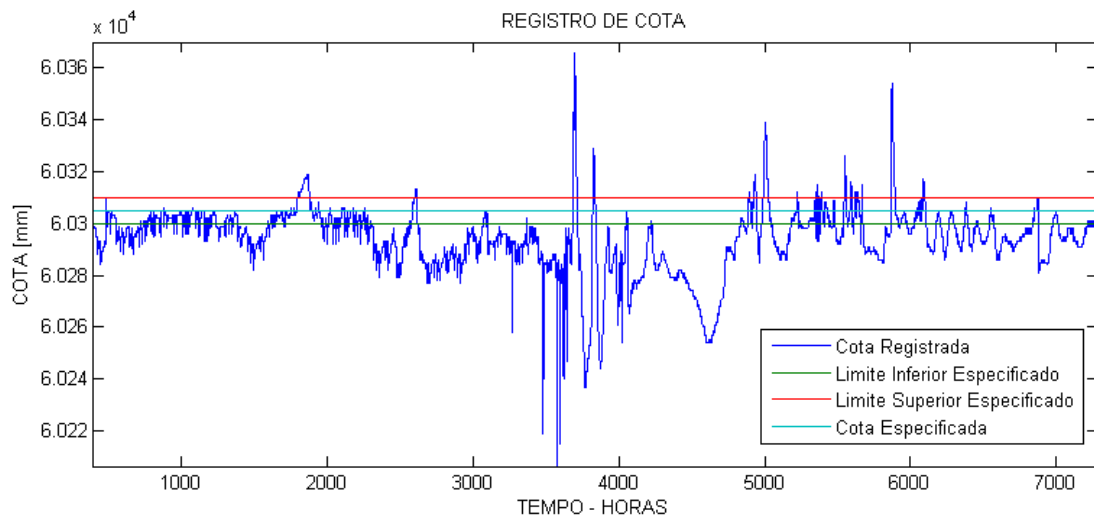


Gráfico 3-10- Comparação Cota Registrada X Cota Especificada

Utilizando das funções de geração, equação (15), modeladas nos capítulos anteriores, pode-se simular o comportamento da usina para a cota especificada e comparar os resultados com o que realmente foi gerado no mesmo período e assim contabilizar a perda na geração. No Gráfico 3-11 tem-se a comparação da potência registrada, o que realmente foi gerado pela usina, em relação a potência simulada para uma cota especificada.

Para a simulação da potência, foi utilizada a equação (19) da potência efetiva:

$$P_e(i)[kW] = k_{med} \times 9,81 \times Q_t(i) \times h_{especificada} \quad (19)$$

Onde:

$k_{med} = 0,9$. Foi considerado um índice de eficiência menor do que o registrado pelas unidades gerados da usina, como um fator de segurança.

$Q_t(i)$ - A vazão turbinada no instante i .

$h_{especificada} = 603,10$.

Portanto temos que:

$$P(i)_{simulada} = P(i)_{efetiva} \quad (20)$$

Enquanto a Potência Registrada é a potência registrada pelo operador da usina no instante i .

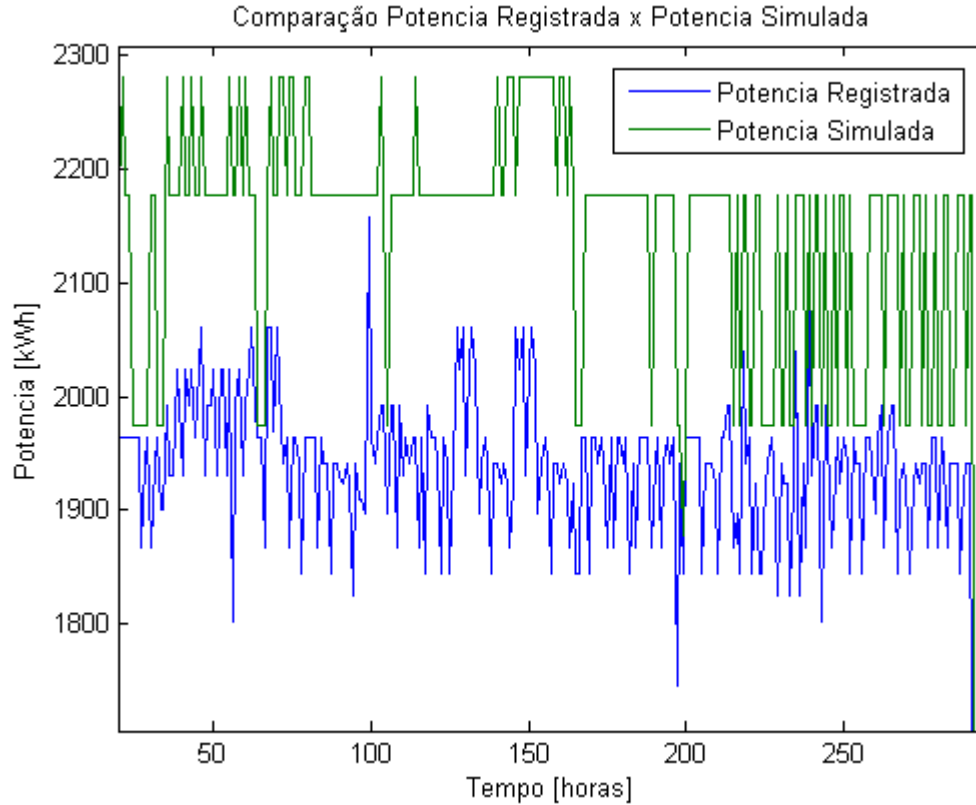


Gráfico 3-11- Comparação Potencia Registrada X Potencia Simulada

Como pode ser observado no gráfico existe uma perda da geração registrada em relação a geração simulada. Essa perda ocorre devido a cota no lago não estar na sua altura de melhor rendimento, e ao se especificar uma cota de operação a capacidade de geração é maior para uma mesma quantidade de água.

Durante as 2.178 horas analisadas foi registrado uma medida de perda de 0,27 MWh. Totalizando uma **perda de 2365 MW** no período de um ano de geração.

3.6.2 Preparação do lago para recebimento de águas de chuva

Como pode se observar nos capítulos anteriores uma grande quantidade de água é perdida pelo vertimento. No período de junho de 2014 a junho de 2015 foi contabilizado uma perda total de 7.308.091 m³ de água, o que deixou de gerar 1014 MW.

Para o aproveitamento da água que até então é perdida através do vertimento é proposto neste trabalho uma metodologia que pode ser aplicada com o auxílio de um sistema de monitoramento e controle do nível do lago.

O sistema de monitoramento e controle do nível do lago será o responsável por determinar a geração instantânea da usina. A geração instantânea será definida seguindo os seguintes princípios:

- Manter o nível do lago dentro dos limites especificados;
- Preparação do nível do lago caso haja possibilidade de vertimento.

O monitoramento do nível do lago, consiste na previsão do nível e a comparação deste nível previsto em relação a cota máxima. Caso seja detectada um nível maior que a cota máxima, situação em que ocorre vertimento, deverá este sistema tomar decisões para uma correta preparação do lago para o recebimento desta água.

3.7 Conclusão

Diversos fatores contribuem para a aplicação da metodologia proposta neste trabalho, além dos altos ganhos com os resultados, alguns fatores relacionados ao cenário atual da PCH Fumaça também contribui para a aplicação dessa metodologia.

O fato da adequação da usina a RESOLUÇÃO CONJUNTA Nº 3, DE 10 DE AGOSTO DE 2010 ANA e ANEEL, impõe regras que contribuem para o sistema de coleta de dados necessários para a aplicação da metodologia proposta. Ou seja, gastos que são obrigatórios para o atendimento a legislação ainda servem para a aplicação de um sistema capaz de otimizar a geração da usina.

Um outro fator que contribui para a aplicação desta metodologia é a disposição geográfica das usinas, podendo realizar uma previsão consistente de alguns dados importantes para a operação da usina.

Com base nos estudos realizados na atual metodologia de operação da PCH Fumaça, pode-se identificar uma série de melhorias que é possível de implementar de maneira rápida e com poucos recursos. Durante a comparação da atual operação com a operação seguindo a metodologia proposta verificou-se uma enorme economia na utilização dos recursos hídricos e com isso o aumento no faturamento da usina.

Para um período de um ano, com os resultados obtidos nesse trabalho conseguiu um ganho total de **3379 MW**. Sendo 2365 MW, do ganho da geração total, relacionado ao aumento do índice de eficiência das unidades geradoras trabalhando com as unidades próximo da sua eficiência máxima e o restante dos 1014 MW relacionado a água vertida.

Referências

- Adriano Pires; Abel Holtz. (Agosto de 2012). Expansão Hidrotérmica. *Sistema Elétrico Brasileiro - Expansão Hidrotérmica*, p. 8.
- ANA, A. N. (2012). *ORIENTAÇÕES PARA OPERAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS*. Brasília - DF: Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica - SGH.
- BOURGES, F. (2009). PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS: ENFOQUE SISTÊMICO. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*.
- ELETROBRAS. (2015). *Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais*. Acesso em 01 de Maio de 2015, disponível em http://www.eletrobras.gov.br/EM_Programas_PCH-COM/capitulos.asp
- Flórez, R. O. (2014). *Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Oficina de Textos.
- GERALDO LÚCIO TIAGO FILHO; CAMILA FERNANDES NUNES. (Abril de 2008). A APLICAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESENVOLVIMENTO LIMPO – MDL EM PROJETOS DE IMPLANTAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – PCHS EM SISTEMAS ISOLADOS NO BRASIL. VI *SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS*, p. 2.
- Guilherme A. R. Maia; Renato C. Zambon; Mario T. L. Barros. (2011). OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió - AL.
- LESCANO, A. M. (2004). Um Modelo de Despacho Econômico para Reservas Operativas. *Dissertação de Mestrado - UNICAMP*.
- Neves, E. T. (1979). *Curso de Hidráulica 6 ed*. Porto Alegre: Editora Globo.
- PINTO, R. A. (2011). ESCOAMENTO EM ORIFÍCIOS E VERTEDORES. *Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA*.

Rodrigo Morais Rosas Ávila; Marcelo Rodrigues Bessa. (2014). Otimização da operação voltada ao negócio de usinas eólicas e pequenas centrais hidrelétricas. *ESPAÇO ENERGIA*.

SBRISSIA, R. C. (2008). EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE RESERVATÓRIOS DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS: ESTUDO DE CASO PCH. *Dissertação de Mestrado*.

VIEIRA, D. P. (2007). MODELO ECONÔMICO DE PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DA GERAÇÃO CONSIDERANDO OS CUSTOS DE PARADA E PARTIDA E OPERAÇÃO COMO COMPENSADOR SÍNCRONO. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*.